



8. Kolmakov V.P. et al. Soedinenie trubchatykh detalei elektricheskim vzryvom provodnika [Connecting tubular parts by the electric explosion of wire]. Irkutsk: IrGTU Publ., 2011. 152 p.
9. Mazurovskii B.Ya. Elektrogidroiimpul'snaya zapressovka trub v trubnykh reshetkakh teploobmennyykh apparatov [Electrohydroimpulse pressing of tubes in tube grids of heat exchangers]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1980. 172 p.
10. Chebotnyagin L.M. Soedinenie trubchatykh detalei impul'snym davleniem rasshiryayushchegosya plazmennogo kanala elektricheskogo razryada: dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.14.12 : zashchishchena 26.11.2014 : utv. 06.04.2015 [Connection of tubular parts by pulse pressure of expanding plasma channel of electric discharge: Ph. D. (Engineering) diss.: 05.14.12 : defended 26.11.2014 : approved 06.04.2015]. Tomsk, 2014. 137 p.
11. Chebotnyagin L.M., Potapov V.V., Lopatin V.V. Kinetics of deformation of alloys by pulsed pressure of an electric discharge. Russian Physics Journal, 2015. Vol. 58. No 1. Pp. 56-62. DOI: 10.1007/s11182-015-0462-4
12. Chebotnyagin L.M., Potapov V.V., Lopatin V.V. Patterns of alloy deformation by pulsed pressure. Russian Physics Journal, 2015. Vol. 58. No 2. P. 212-220. DOI: 10.1007/s11182-015-0484-y
13. Kolmakov V.P., Grechneva M.V., Potapov V.V., Chebotnyagin L.M. Improving the quality of the tube-tube plate welded joint in welding with the energy of electrical explosion of a conductor. Welding International, 2015. Vol. 29, Issue 8, Pp. 633-638. DOI: 10.1080/09507116.2014.960699
14. Deribas A. A. Fizika uprochneniya i svarki vzryvom [Physics of hardening and explosion welding]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1980. 221 p.
15. Cole R. H. Underwater Explosions: Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1948. 495 p.
16. Anuchin M. A. Shtampovka vzryvom. Osnovy teorii [Explosion stamping. Fundamentals of the theory]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1972. 150 p.
17. Drabkina S.I. K teorii razvitiya kanala iskrovogo razryada [On the theory of the spark discharge channel development]. ZhETF [JETP]. 1951. Vol. 21. Iss. 4. Pp. 473-483.
18. Krug K.A. Osnovy elektrotekhniki. Ch.2. [Fundamentals of electrical engineering. Part 2]. Moscow: Gosenergoizdat Publ., 1946. 637 p.

### Информация об авторах

### Authors

*Чеботнягин Леонид Михайлович* – к. т. н., доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника», ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, e-mail: leonid@istu.edu.

*Потапов Василий Васильевич* – к. т. н., доцент, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехника», ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, e-mail: otep2@istu.edu.

*Leonid Mikhailovich Chebotnyagin* – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof. at the Subdepartment of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: leonid@istu.edu.

*Vasilii Vasil'evich Potapov* – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Prof. at the Subdepartment of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: otep2@istu.edu.

### Для цитирования

### For citation

Чеботнягин Л. М. Влияние конструкции электровзрывного картриджа на профиль металлической трубы при скоростном деформировании импульсным давлением / Л. М. Чеботнягин, В. В. Потапов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 13–22. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).13–22

Chebotnyagin L. M., Potapov V. V. Vliyanie konstruktssii elektrovzryvnogo kartridzha na profil' metallicheskoj truby pri skorostnom deformirovaniy impul'snym davleniem [The effect of the electroexplosive cartridge design on the profile of a metal pipe at high-speed deformation by pulse pressure]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2019. Vol. 63, No. 3, pp. 13–22. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).13–22

УДК 620.179

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).22–31

**М. А. Степанов, А. П. Степанов**

*Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

*Дата поступления: 04 апреля 2019*

## ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗГИБНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФЕКТОВ ВНУТРИ СИММЕТРИЧНЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ СТАЛЬНОЙ БАЛКИ

**Аннотация.** В статье анализируются способы обнаружения и распределение изгибных напряжений и дефектов в материале симметричных поперечных сечений протяженных стальных профилей по картинам магнитного поля, предварительно созданных симметричными относительно геометрических фигур их поперечных сечений. При анализе картин внешнего магнитного поля на поверхности контролируемого поперечного сечения на участке контроля протяженного профиля возникают задачи оценки внутренних напряжений и дефектов в сечении, а также задачи, связанные с распределением магнитной индукции с указанными напряжениями и дефектами и напряжения в сечениях на участке контроля. В работе использовались спосо-



бы магнитного контроля протяженных ферромагнитных объектов, имеющих в своем поперечном сечении простую геометрическую фигуру симметричную относительно одной или более осей симметрии, а также математический аппарат дисциплин по сопротивлению материалов и теоретической электротехники. Полученные в результате исследования выкладки проверены на цифровых моделях и подтверждены натурными экспериментами. Использование на практике рассмотренных способов неразрушающего магнитного контроля и оценки технического состояния протяженных ферромагнитных профилей с симметричными поперечными сечениями без вывода их из рабочего состояния позволяет ускорить процесс контроля, делает его наглядным и простым в реализации.

**Ключевые слова:** неразрушающий магнитный контроль, протяженные ферромагнитные профили, симметричные поперечные сечения, оценка изгибных напряжений и дефектов.

*M. A. Stepanov, A. P. Stepanov*

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation*

*Received: April 04, 2019*

## ESTIMATION OF THE DISTRIBUTION OF FLEXURAL STRESSES AND DEFECTS INSIDE SYMMETRICAL CROSS-SECTIONS OF A STEEL BEAM

**Abstract.** *The article analyzes ways of the detection and distribution of bending stresses and defects in the material of symmetrical cross-sections of extended steel profiles using magnetic field patterns, previously created as symmetrical with respect to the geometric shapes of their cross-sections. When analyzing the patterns of an external magnetic field on the surface of a controlled cross-section in the extended profile control section, it might be necessary to evaluate the internal stresses and defects in the section, as well as to figure out how the magnetic induction distribution is related to the indicated stresses and defects, and how the stresses are distributed in the sections in the control section. We used methods of magnetic control of extended ferromagnetic objects, having in their cross-section a simple geometrical figure symmetrical about one or more axes of symmetry, as well as the mathematical tools of subject matters on the resistance of materials and theoretical electrical engineering. The calculations obtained in the work were verified using digital models and confirmed by full-scale experiments. The use in practice of the considered methods of non-destructive magnetic control and the evaluation of the technical state of extended ferromagnetic profiles with symmetrical cross-sections, without taking them out of working condition, allows us to speed up the control process, making it intuitive and easy to implement.*

**Keywords:** *non-destructive magnetic control, extended ferromagnetic profiles, symmetrical cross-sections, assessment of flexural stresses and defects.*

### Введение

Решение задачи неразрушающего контроля и диагностики напряженного состояния элементов стальных конструкций, находящихся в рабочем положении, требует новых подходов. На транспорте, в строительстве и в промышленности большое число элементов протяженных стальных конструкций представляют собой профили с поперечными сечениями в виде простых геометрических фигур симметричных относительно одной или более осей симметрии (например, в виде прямоугольника и др.). К таким конструкциям можно отнести балки, рельсы, трубопроводы. Трудности применения существующих методов контроля связаны с протяженностью объектов контроля и, как правило, невозможностью их выведения из работы на период контроля по разным технологическим причинам, а также в связи с существенными ограничениями по параметрам контроля в самих методах [1–3].

Учитывая особенности указанных стальных профилей, были разработаны новые способы магнитного контроля, позволяющие выявлять в однородном ферромагнитном материале сечений де-

фекты, структурные изменения и механические напряжения, на которые разбивается участок контроля протяженного профиля [4–9].

### Постановка задачи

Реализация способов сводится к созданию на участке протяженного объекта контроля симметричного магнитного поля относительно геометрической фигуры поперечного сечения объекта. Дефекты, структурные изменения и (или) механические напряжения в материале поперечного сечения объекта контроля нарушают симметрию созданного магнитного поля поперечного сечения объекта контроля. Измерение магнитной индукции в попарно симметричных точках на поверхности объекта относительно осей симметрии геометрической фигуры поперечных сечений на поверхности объекта позволяет сделать оценку дефектов, структурных изменений и (или) механических напряжений в материале поперечных сечений на контролируемом участке [4–9].

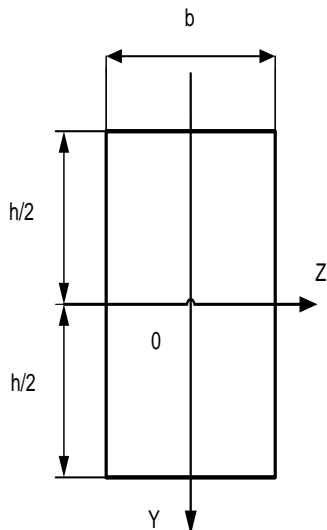
Сделаем анализ магнитной индукции внешнего магнитного поля от изгибных напряжений и дефектов внутри симметричных относительно



двух и одной оси симметрии геометрической фигуры поперечных сечений стальной балки.

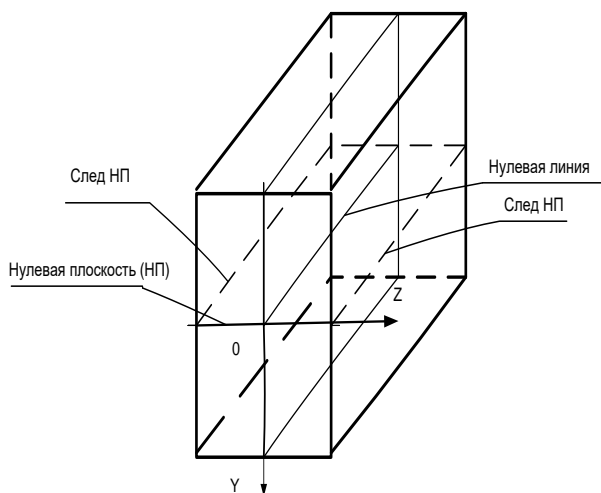
**Решение задачи**

Будем считать, что на стальную балку с прямоугольным поперечным сечением (рис. 1) действует внешняя изгибающая сила (сверху вниз).

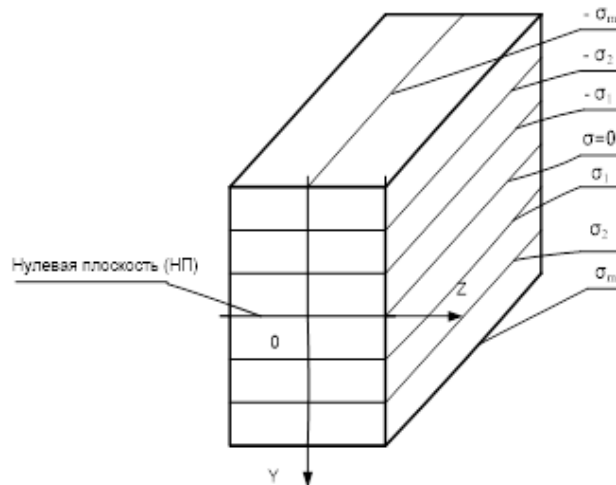


**Рис. 1. Поперечное сечение балки**

За участок контроля выберем участок чистого изгиба балки, у которой верхние продольные волокна (плоскости) от нейтральных продольных волокон сжимаются, а нижние продольные волокна растягиваются, оставаясь параллельными друг другу [10]. Нормальное напряжение  $\sigma$  для нейтральной плоскости (НП) будет равно нулю  $\sigma = 0$ , для верхних плоскостей нормальное напряжение будет меньше нуля  $\sigma < 0$ , а для нижних плоскостей больше нуля  $\sigma > 0$  (рис. 2, 3) [10].



**Рис. 2. Следы нулевой плоскости балки**



**Рис. 3. Нормальные напряжения слоёв (продольных волокон) при чистом изгибе балки**

Нейтральная плоскость проходит через центр тяжести прямоугольного поперечного сечения балки и оси координат Z, при этом нормальное напряжение на двух следах НП на поверхности балки на участке чистого изгиба будет также равно нулю  $\sigma = 0$ . В соответствии с данными анализируемых работ [10], в  $n$ -ом поперечном сечении на участке чистого изгиба балки нормальное напряжение по абсолютной величине будет изменяться по следующему закону:

$$\sigma(y) = \frac{2\sigma_m[n]}{h} y, \tag{1}$$

$$\sigma_m[n] = \frac{3l}{2bh^2} K \Delta B_{BH}[n] = k \Delta B_{BH}[n], \tag{2}$$

здесь  $\sigma_m[n]$  – модуль максимального нормального напряжения в слоях на поверхности в  $n$ -ом сечении балки;  $\Delta B_{BH}[n] = ||B_B[n]| - |B_H[n]||$  – абсолютное значение разности модулей магнитной индукции в попарно симметричных точках на верхней  $B_B[n]$  и нижней  $B_H[n]$  поверхностях  $n$ -го сечения балки (рис. 5);  $k = \frac{3l}{2bh^2} K$  – коэффициент пропорциональности между модулем максимального нормального напряжения в слоях на поверхности балки и абсолютным значением разности модулей магнитной индукции в попарно симметричных точках на верхней и нижней поверхностях  $n$ -го сечения балки;  $K$  – магнитоупругий коэффициент между внешней изгибающей силой и абсолютным значением разности модулей магнитной индукции в попарно симметричных точках на верхней и нижней поверхностях  $n$ -го сечения балки (находится экспериментально для каждой балки);  $b$  и  $h$  – конструктивные размеры поперечного сечения балки (рис. 1) (длина  $l$  балки на рисунке не показана) (рис. 3–5).

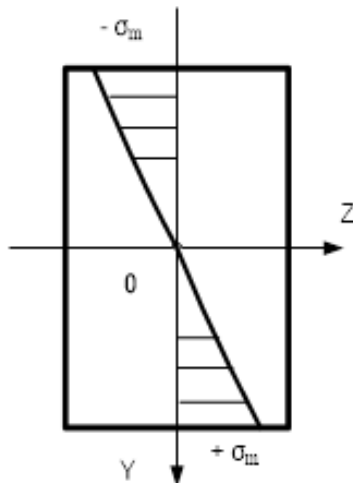
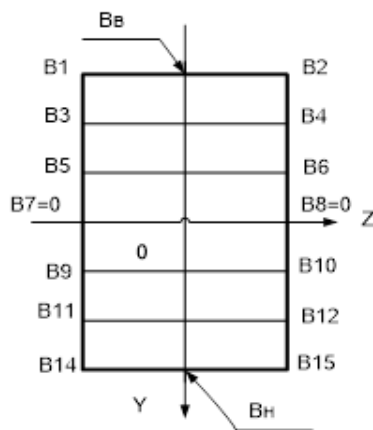
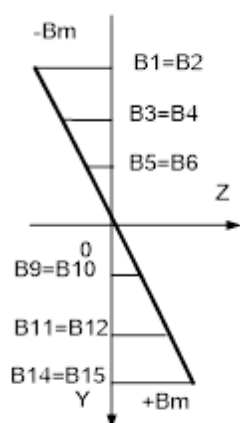


Рис. 4. Эпюра напряжения в сечении балки при чистом изгибе



а) – попарно симметричные точки



б) – диаграмма магнитной индукции

Рис. 5. Попарно симметричные точки относительно оси  $Y$  поперечного сечения балки (а) и диаграмма распределения магнитной индукции при симметричном магнитном поле (б)

Рассмотрим распределение магнитной индукции симметричного магнитного поля относительно осей  $Y$  и  $Z$ . С помощью намагничивающей системы намагнитим балку симметричным внешним магнитным полем на участке контроля с образованием двух магнитных полюсов по оси  $Y$ . Например, верхняя плоскость балки будет иметь отрицательную магнитную индукцию, а нижняя положительную для всех поперечных сечений на контролируемом участке чистого изгиба балки.

Для попарно симметричных точек относительно оси  $Y$ , лежащих на соответствующих следах, введенных ранее плоскостей, можно записать равенства модулей магнитной индукции (см. рис. 3, 4):

$$\begin{aligned} B_1 = B_2, B_3 = B_4, B_5 = B_6, B_7 = B_8, B_9 = B_{10}, \\ B_{11} = B_{12}, B_{14} = B_{15}. \end{aligned} \quad (3)$$

При отсутствии дефектов, структурных изменений и локальных механических напряжений в материале сечений магнитная индукция следа нулевой плоскости сечений будет равна нулю  $B_7 = B_8 = 0$  (см. рис. 2-4). Тогда по отклонению следа магнитной индукции от следа, определяемого геометрической фигурой поперечного сечения балки, можно оценить сечения с дефектом, структурным изменением и (или) с внутренним напряжением на контролируемом участке балки. Например, отклонение следа нулевой магнитной индукции  $B = 0$  от геометрического следа нулевой плоскости  $\sigma = 0$  или отклонение следа магнитной индукции выбранной  $m$ -ой виртуальной плоскости с магнитной индукцией  $B_m$  от ее геометрического следа позволяет определить поперечное сечение с дефектом, структурным изменением или с внутренним напряжением [4].

Как отмечалось, после приложения внешней изгибающей силы внутренние слои балки деформируются, напряжения слоев и их следов на поверхности балки примут значения отличные от исходных (см. рис. 3, 4). Измерения магнитной индукции в соответствующих попарно симметричных точках на верхней и нижней поверхностях  $n$ -го поперечного сечения балки (см. рис. 5, а) позволяет определить максимальное напряжение по зависимости (2), затем определить распределение нормального напряжения по выражению (1). Отметим, что измерения магнитной индукции по выбранным следам на боковой поверхности балки позволяет проследить следы слоев с соответствующими нормальными напряжениями (см. рис. 5, б). При отсутствии дефектов, структурных изменений и локальных механических напряжений следы слоев напряжений и магнитной индукции в



каждом сечении будут параллельны друг другу в парно симметричных точках [10].

Если геометрическая фигура поперечного сечения профиля симметрична относительно двух осей, как для балки с прямоугольным сечением, то нейтральная плоскость проходит через центры тяжести этой геометрической фигуры и эпюра распределения нормального напряжения при чистом изгибе профиля будет аналогичной (см. рис. 5), (рис. 6) [10]. В этом случае соотношения (1) и (2) для нормального напряжения будут справедливы, что и для балки с прямоугольным сечением, при изменении координаты виртуальных плоскостей  $u$  от 0 до  $\pm h/2$  или  $\pm D/2$  [10]. Отметим, что для реализации зависимости (2) априори необходимо получить значение коэффициента  $k$ , характеризующего механические и магнитоупругие свойства выбранного профиля [9].

Рассмотрим распределение нормального напряжения в сечении балки при чистом изгибе с симметрией фигуры поперечного сечения относительно только одной оси  $Y$  (рис. 7) [10].

Максимальное нормальное напряжение верхнего слоя профилей  $\sigma_{m1}$  находится по выражению (1) по координате  $y = h_1$ , нормальное напря-

жение нижнего слоя профилей  $\sigma_{m2}$  находится по тому же выражению по координате  $y = h_2$ , при своих моментах инерции  $J_z$  (рис. 7, в) [10]. В двух слоях профиля при равенстве координат  $y_k$  по модулю ( $y_k = | -y_k |$ ) модули нормального напряжения будут равны между собой, т. е.  $\sigma_{mk}(y_k) = \sigma_{mk}(-y_k)$ .

При отсутствии внешней изгибающей силы, дефектов и (или) механических напряжений в сечениях профиля картины внешнего магнитного поля сечений профиля будут симметричны относительно только одной оси координат  $Y$ , если намагнитить профиль на участке контроля поперечным магнитным полем вдоль оси координат  $Y$  с образованием двух магнитных полюсов на верхней и нижней площадках сечений. В этом случае след нулевой магнитной индукции будет проходить выше или ниже следа НП напряжения (рис. 7) [11, 12].

При чистом изгибе балки на участке контроля оценим координату  $y_{oz}$  следа  $B=0$  относительно следа  $\sigma=0$  путем сравнения магнитных полей сечений с отличной друг от друга симметрией поперечных сечений при прочих равных условиях (см. рис. 4), (см. рис. 7, б), (рис. 8).

С помощью намагничивающей системы для

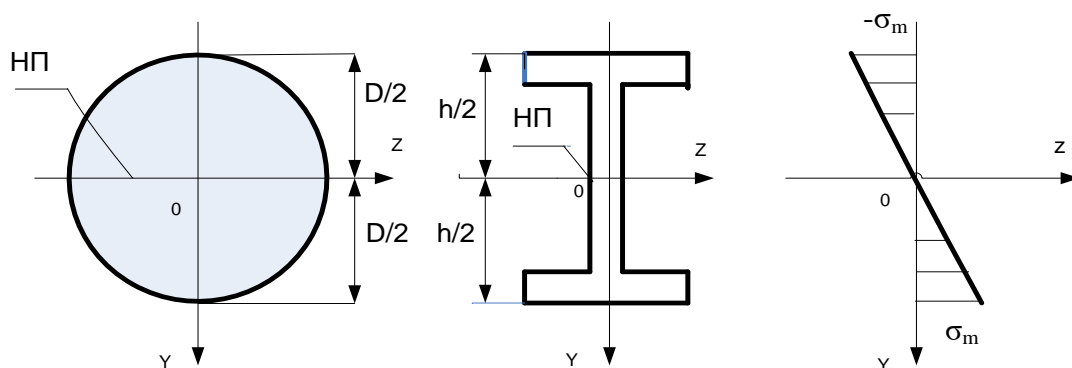


Рис. 6. Поперечные сечения симметричные относительно  $Y$  и  $Z$  осей с симметричной эпюрой напряжения

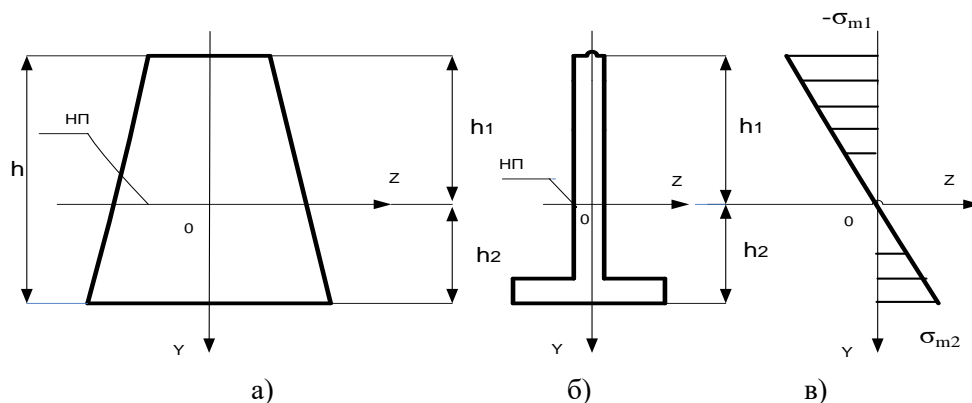


Рис. 7. Поперечные сечения «а» и «б» профилей с симметрией относительно одной оси  $Y$ , и эпюра «в» нормального напряжения в сечениях при чистом изгибе



обоих поперечных сечений создадим внешнее магнитное поле вдоль оси  $Y$  с образованием двух магнитных полюсов на верхней и нижней площадках сечений с постоянной напряженностью  $H_e$  (рис. 8). Будем считать в магнитных цепях сечений магнитный поток  $\Phi$  неизменным (рис. 8). Для магнитной цепи (рис. 8, а) площадь прохождения магнитного потока по верхней  $S_1$  и нижней площадках  $S_2$  остается постоянной в силу их равенства  $S_1 = S_2$ . Отсюда вытекает равенство модулей магнитной индукции для указанных площадок:

$$B_1 = B_2, \quad (4)$$

т. к. выполняются соотношения  $B_1 = \Phi/S_1$  и  $B_2 = \Phi/S_2$ .

Истинная напряженность  $H_{u1}$  первого участка  $l_1$  будет равна по модулю истинной напряженности  $H_{u2}$  второго участка  $l_2$  магнитной цепи, поскольку магнитная проницаемость на первом и втором участках магнитной цепи остается постоянной по величине

$$H_{u1} = H_{u2}. \quad (5)$$

Напряженность истинного магнитного поля поперечного сечения балки определяется по выражению

$$H_u = H_{u1} + H_{u2} = \text{const}. \quad (6)$$

Между верхней и нижней точками (1 и 2) магнитной цепи двух поперечных сечений падение магнитного напряжения  $U_{m12}$  остается постоянным (см. рис. 8, а, б):

$$U_{m12} = H_e L = H_u l = H_{u1} l_1 + H_{u2} l_2 = \text{const}, \quad (7)$$

где  $H_e$  – напряженность магнитного поля намагничивающей системы;  $L$  – длина магнитной цепи намагничивающей системы;  $l = l_1 + l_2$  – длина поперечного сечения [13].

С учетом выражений (5)–(7) можно записать соотношение для падений магнитного напряжения на двух участках магнитной цепи (см. рис. 8, а):

$$H_{u1} l_1 = H_{u2} l_2. \quad (8)$$

Откуда следует равенство:

$$l_1 = l_2 = h/2, \quad (9)$$

что соответствует совпадению следов  $B = 0$  и  $\sigma = 0$  на боковых поверхностях балки (см. рис. 8, а).

Из сравнения магнитной цепи (см. рис. 8, а) и магнитной цепи (см. рис. 8, б) при условии равенства магнитного потока для обоих сечений можно записать для магнитной цепи (см. рис. 8, б):

$$\begin{aligned} S_2 &> S_1, \\ B_1 &> B_2, \end{aligned} \quad (10)$$

здесь  $S_1$  и  $S_2$  площади первой и второй площадок соответствующей магнитной цепи; магнитная индукция на первом  $B_1 = \Phi/S_1$  и втором  $B_2 = \Phi/S_2$  участках магнитной цепи (см. рис. 8, б).

Из соотношения (10) следует, что истинная магнитная напряженность на втором участке магнитной цепи будет меньше истинной магнитной напряженности на первом участке в силу равенства магнитной проницаемости материала во всем теле поперечного сечения  $\mu_1 = \mu_2$  (см. рис. 8, б):

$$H_{u2} < H_{u1}, \quad (11)$$

где  $H_{u1} = B_1/\mu_1$  – истинная магнитная проницаемость на первом участке магнитной цепи;  $H_{u2} = B_2/\mu_2$  – истинная магнитная проницаемость на втором участке магнитной цепи.

Равенство падений магнитного напряжения на двух участках магнитной цепи (8) с учетом неравенства (11) позволяет записать соотношение для длин участков поперечного сечения балки:

$$l_2 > l_1 \quad (12)$$

Для нулевой плоскости поперечного сечения балки (см. рис. 8, б) выполняется соотношение

$$h_1 > h_2. \quad (13)$$

Из соотношений (12) и (13) следует, что следы нулевой магнитной индукции ( $B = 0$ ) будут проходить выше и параллельно следам нулевой плоскости ( $\sigma = 0$ ) вдоль длины профиля на вели-

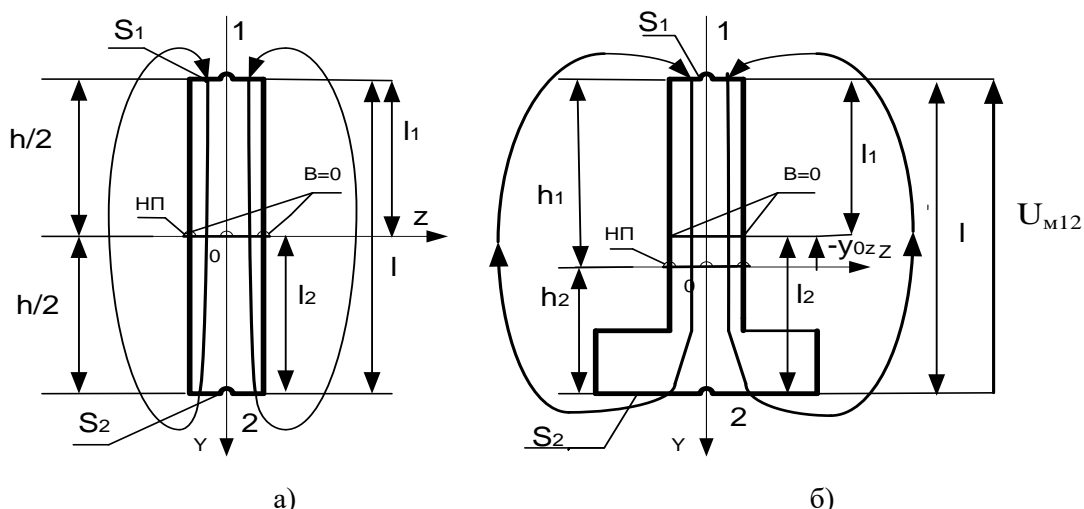


Рис. 8. Конструктивные параметры магнитных цепей прямоугольного (а) и Т-образного поперечных сечений балки (б)



чину координаты  $y_{0z}$  (см. рис. 8, б).

Рассмотрим балку с прямоугольным поперечным сечением, к которой приложена изгибающая сила сверху балки. Найдем соотношения между длинами участков магнитной цепи  $l_1$  и  $l_2$  поперечного сечения балки.

После создания на участке контроля симметричного магнитного поля относительно оси  $Y$  поперечного сечения балки, произойдет нарушение соотношения (4). Растяжение верхних продольных слоев балки приводит к уменьшению намагниченности  $J_1$  и магнитной проницаемости  $\mu_1$  в материале на первом участке магнитной цепи  $l_1$ , а сжатие нижних продольных слоев балки приводит к соответствующему увеличению намагниченности  $J_2$  и магнитной проницаемости в материале на втором участке магнитной цепи  $l_2$ . При этом магнитная индукция  $B_1$  на первом участке  $l_1$  магнитной цепи уменьшится, а на втором участке  $l_2$  магнитная индукция  $B_2$  увеличится по сравнению со своими начальными значениями, которые они имели бы при отсутствии изгибающей силы (4) (см. рис. 8, а) [11].

Напряженность внешнего магнитного поля  $H_e$  для верхней и нижней частей поперечного сечения балки можно поделить на две равных части  $H_e/2$ , тогда истинная напряженность магнитного поля на участках  $l_1$  и  $l_2$  магнитной це-

пи определится из выражений

$$H_{u1} = H_e/2 - NJ_1, \tag{14}$$

$$H_{u2} = H_e/2 - NJ_2, \tag{15}$$

здесь  $J_1$  и  $J_2$  – намагниченность материала соответственно на первом и на втором участках магнитной цепи;  $N$  – коэффициент размагничивания [13].

Из выражений (14) и (15) при выполнении неравенства для намагниченностей  $J_1 < J_2$  для участков магнитной цепи можно записать неравенство для напряженностей магнитного поля:

$$H_{u2} < H_{u1}. \tag{16}$$

Отсюда следует соотношение между длинами участков магнитной цепи:

$$l_2 > l_1. \tag{17}$$

Тогда, на участке чистого изгиба балки следы нулевой магнитной индукции ( $B = 0$ ) будут проходить выше следов нулевой плоскости ( $\sigma = 0$ ) (рис. 9):

$$y[n] = l_1[n] - l_2[n] = -y_0[n], \tag{18}$$

здесь  $y[n]$  – координата  $n$ -го поперечного сечения балки;  $y_0[n]$  – величина смещения следа нулевой магнитной индукции  $B = 0$  относительно следа нулевой плоскости  $\sigma = 0$  для  $n$ -го поперечного сечения балки (зависит от величины внешней изгибающей силы).

Проведем анализ магнитного поля поперечного сечения балки с дефектом в виде раковины на

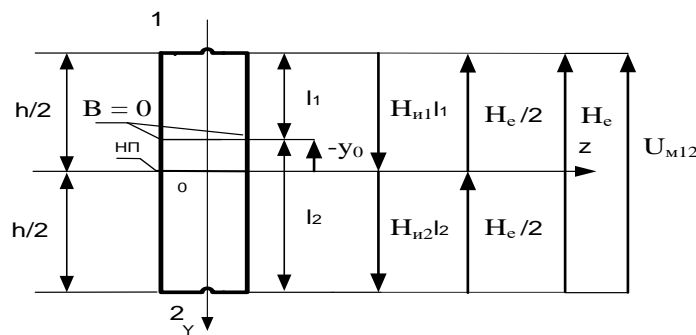


Рис. 9. Схема магнитной цепи поперечного сечения при изгибе балки

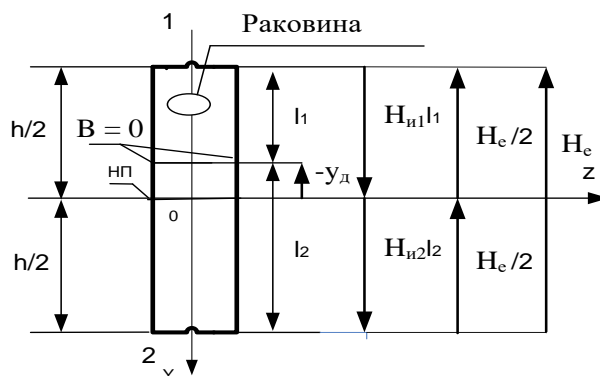


Рис. 10. Поперечное сечение балки с дефектом



первом участке магнитной цепи (рис. 10).

После поперечного намагничивания по оси  $Y$ , магнитная индукция  $B_1$  увеличится по модулю по сравнению с модулем магнитной индукции  $B_2$  за счет уменьшения эффективной площади сечения  $S_1$  по сравнению с площадью  $S_2$  при постоянном магнитном потоке  $\Phi$  (рис. 10).

При постоянной магнитной проницаемости по всему  $n$ -му сечению балки ( $\mu_1 = \mu_2$ ) получим, что напряженность магнитного поля  $H_{u2}$  на втором участке магнитной цепи  $l_2$  будет меньше напряженности магнитного поля  $H_{u1}$  на первом участке магнитной цепи  $l_1$ :

$$H_{u2} < H_{u1}.$$

С учетом предыдущего анализа и выражения (8) вытекает соотношение между длинами участков магнитной цепи:

$$\Delta l = l_2 - l_1 > 0.$$

В нашем случае для  $n$ -го сечения с дефектом в верхней части сечения, отклонение следа нулевой магнитной индукции ( $B = 0$ ) от своего «нормального» положения, определяемого поперечными сечениями без дефектов, отклонится в сторону дефекта на величину  $y_{\delta} [n] = \Delta l [n]$  (см. рис. 10):

$$y [n] = -y_{\delta} [n] = -\Delta l [n]. \quad (19)$$

Если в каком-либо  $n$ -ом поперечном сечении на участке чистого изгиба балки образовался дефект, то результирующее отклонение следа  $B = 0$

от своего «нормального» положения в этом сечении определится следующей координатой (см. рис. 9, 10):

$$y [n] = l_1 [n] - l_2 [n] = -y_0 [n] - y_{\delta} [n]. \quad (20)$$

Для балки, имеющей геометрическую фигуру поперечного сечения не симметричную относительно оси  $Z$ , следы нулевой магнитной индукции  $B=0$  в  $n$ -ом сечении, при прочих равных условиях, на участке контроля к соотношению (20) добавится смещение координаты  $-y_{0z}$  (см. рис. 7), (см. рис. 8, б):

$$y [n] = l_1 [n] - l_2 [n] = -y_0 [n] - y_{\delta} [n] - y_{0z} [n]. \quad (21)$$

Следы равных магнитных индукций в парно симметричных точках на боковых поверхностях балки на участке контроля позволяют оценить положение локальных напряжений и дефектов в сечениях.

Полученные зависимости были проверены на цифровых моделях и объектах контроля [4–9].

### Выводы

Проанализированы распределения магнитной индукции поперечного сечения стального профиля для двух видов симметрии поперечного сечения в зависимости от изгибных напряжений и дефектов в сечениях на контролируемом участке. Получены зависимости отклонения следов магнитной индукции на боковых поверхностях протяженного профиля от внутреннего состояния структуры его сечений на контролируемом участке.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горбаш, В.Г. Неразрушающий контроль в промышленности. Магнитный контроль. / В.Г. Горбаш, М.Н. Делендик, П.Н. Павленко Неразрушающий контроль и диагностика. №2, 2011.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т./ Под общ. Ред. В.В. Клюева. Т. 4: В 3 кн. Кн. 1. В.А. Анисимов, Б.И. Каторгин, А.Н. Куценко и др. Акустическая тензометрия. Кн. 2. Г.С. Шелихов. Магнитопорoshковый метод контроля. Кн. 3. М.В. Филинов. Капиллярный контроль. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 736 с.: ил.
3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т./ Под общ. Ред. В.В. Клюева. Т. 6: В 3 кн. Кн. 1. В.В. Клюев, В.Ф. Мужижкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. Магнитные методы контроля. Кн. 2. В.Н. Филинов, А.А. Кеткович, М.В. Филинов. Оптический контроль. Кн. 3. В.И. Матвеев. Радиоволновой контроль. – 2-е изд. Испр.- М.: Машиностроение, 2006.- 848 с.: ил.
4. Пат. № 2387983 Российская Федерация, RU 2 387 983 С1, МПК G01N 27/82 (2006.01). Способ магнитной дефектоскопии / Степанов А.П., Степанов М.А., Милованов А.И., Саломатов В.Н., Лопатин М.В.; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщен. – № 2008143039/28, заявл. 29.10.2008, опубл. 27.04.2010, Бюл. №12. – 5 с.
5. Пат. № 2441227 Российская Федерация, RU 2 441 227 С1, МПК G01N 27/72 (2006.1). Способ магнитной дефектоскопии изделий в напряжённом состоянии / Степанов А.П., Милованов А.И., Степанов М.А.; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщен. – № 2010121417/28, заявл. 26.05.2010, опубл. 27.01.2012, Бюл. №3. – 3 с.
6. Пат. № 2452943 Российская Федерация, RU 2 452 943 С1, МПК G01N 27/82 (2006.1). Способ обнаружения изгибных напряжений / Степанов А.П., Степанов М.А., Милованов А.И., Саломатов В.Н.; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщен. – № 2010142042/28, заявл. 13.10.2010, опубл. 10.06.2012, Бюл. №16. – 5 с.
7. Пат. № 2455634 Российская Федерация, RU 2 455 634 С1, МПК G01N 27/80 (2006.1). Способ оценки запаса прочности изделий в процессе эксплуатации / Степанов А.П., Степанов М.А., Милованов А.И., Милованова Е.А., Саломатов В.Н.; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщен. – № 2010145975/28, заявл. 10.11.2010, опубл. 10.07.2012, Бюл. №19. – 5 с.
8. Пат. № 2521753 Российская Федерация, RU 2 521 753 С1, МПК G01N 27/82 (2006.1). Способ оперативного обнаружения дефектов и механических напряжений в протяжённых конструкциях / Степанов М.А., Степанов А.П., Пыхалов А.А.; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщен. – № 2013100328/28, заявл. 09.01.2013, опубл. 10.07.2014, Бюл. №19. – 5 с.
9. Пат. № 2590224 Российская Федерация, RU 2 590 224 С1, МПК G01N 27/72 (2006.1). Способ оценки изгибных напряжений в элементах конструкций / Степанов А. П., Степанов М.А.; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщен. – № 2015112783/28, заявл. 07.04.2015, опубл. 10.07.2016, Бюл. №19.
10. Степанов, А.П. Способ магнитной дефектоскопии протяжённых ферромагнитных конструкций / А.П. Степанов, М.А. Степанов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – №1(33). – С. 69.
11. Степанов, М.А. Способ магнитной дефектоскопии ферромагнитных конструкций, находящихся в напряженном состоянии / М.А. Степанов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – №4(36). – С. 154.
12. Степанов, А.П. Метод магнитного контроля и диагностики напряжённого состояния элементов стальных конструкций,





имеющих осесимметричное сечение / А.П. Степанов, М.А. Степанов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – № 1 (49). – С. 60.

13. Сопrotivление материалов: Учебник для вузов / Под общ. ред. академ. АН УССР Г. С. Писаренко. – 4-е изд. перераб и доп. – Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1979. – 696с.
14. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники: Электромагнитное поле / Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1978. – 231с.
15. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа, – 1978. – 528 с.
16. Кифер, И. И. Испытания ферромагнитных материалов / И.И. Кифер, В.С. Пантюшин. – М.: Госэнергоиздат, 1955. – 240 с.

## REFERENCES

1. Gorbash V.G., Delendik M.N., Pavlenko P.N. Nerazrushayushchii kontrol' v promyshlennosti. Magnitnyi kontrol' [Magnetic control]. Nerazrushayushchii kontrol' i diagnostika [Non-destructive testing and diagnostics]. No.2, 2011.
2. Nerazrushayushchii kontrol': Spravochnik: V 8 t. [Non-destructive testing: a reference book: In 8 vols]. In Klyuev V.V. (gen. ed.). Vol. 4: In 3 books. Book 1. Anisimov V.A., Katorgin B.I., Kutsenko A.N. et al. Akusticheskaya tenzometriya [Acoustic strain measurement]. Book 2. Shelikhov G.S. Magnitoporoshkovyi metod kontrolya [Magnetic powder control method]. Book 3. Filinov M.V. Kapillyarnyi kontrol' [Capillary control]. 2nd ed., corr. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2006. 736 p.: il.
3. Nerazrushayushchii kontrol': Spravochnik: V 8 t. [Non-destructive testing: A reference book: In 8 vols]. In Klyuev V.V. (gen. ed.). Vol. 6: In 3 books. Book 1. Klyuev V.V., Muzhitskii V.F., Gorkunov E.S., Shcherbinin V.E. Magnitnye metody kontrolya [Magnetic control methods]. Book 2. Filinov V.N., Ketkovich A.A., Filinov M.V. Opticheskii kontrol' [Optical control]. Book 3. Matveev V.I. Radiovolnovoi kontrol' [Radiowave control]. 2nd ed., corr. Moscow: Mashinostroenie Publ, 2006. 848 p.: il.
4. Stepanov A.P., Stepanov M.A., Milovanov A.I., Salomatov V.N., Lopatin M.V. Sposob magnitnoi defektoskopii [Method of magnetic flaw detection]. Pat. No. 2387983 Russian Federation, RU 2 387 983 C1, MPK G01N 27/82 (2006.01); applicant and patent holder is Irkutsk State Transport Un-ty. No. 2008143039/28, applied 29.10.2008, publ. 27.04.2010, Bull. No.12. 5 p.
5. Stepanov A.P., Milovanov A.I., Stepanov M.A. Sposob magnitnoi defektoskopii izdelii v napryazhennom sostoyanii [The method of magnetic inspection of articles in tension]. Pat. No. 2441227 Russian Federation, RU 2 441 227 C1, MPK G01N 27/72 (2006.1); applicant and patent holder is Irkutsk State Transport Un-ty. No. 2010121417/28, applied 26.05.2010, publ. 27.01.2012, Bull. No.3. 3 p.
6. Stepanov A.P., Stepanov M.A., Milovanov A.I., Salomatov V.N. Sposob obnaruzheniya izgibnykh napryazhenii [Method for detecting bending stresses]. Pat. No. 2452943 Russian Federation, RU 2 452 943 C1, MPK G01N 27/82 (2006.1); applicant and patent holder is Irkutsk State Transport Un-ty. No. 2010142042/28, applied 13.10.2010, publ. 10.06.2012, Bull. No.16. 5 p.
7. Stepanov A.P., Stepanov M.A., Milovanov A.I., Milovanova E.A., Salomatov V.N. Sposob otsenki zapasa prochnosti izdelii v protsesse ekspluatatsii [The method of evaluating the safety factor of products during operation]. Pat. No. 2455634 Russian Federation, RU 2 455 634 C1, MPK G01N 27/80 (2006.1); applicant and patent holder is Irkutsk State Transport Un-ty. No. 2010145975/28, applied 10.11.2010, publ. 10.07.2012, Bull. No.19. 5 p.
8. Stepanov M.A., Stepanov A.P., Pykhalov A.A. Sposob operativnogo obnaruzheniya defektov i mekhanicheskikh napryazhenii v protyazhennykh konstruktivnykh [Method for the operational detection of defects and mechanical stresses in extended structures]. Pat. No. 2521753 Russian Federation, RU 2 521 753 C1, MPK G01N 27/82 (2006.1); applicant and patent holder is Irkutsk State Transport Un-ty. No. 2013100328/28, applied 09.01.2013, publ. 10.07.2014, Bull. No.19. 5 p.
9. Stepanov A. P., Stepanov M.A. Sposob otsenki izgibnykh napryazhenii v elementakh konstruktivnykh [A method for evaluating bending stresses in structural elements]. Pat. No. 2590224 Russian Federation, RU 2 590 224 C1, MPK G01N 27/72 (2006.1); applicant and patent holder is Irkutsk State Transport Un-ty. No. 2015112783/28, applied 07.04.2015, publ. 10.07.2016, Bull. No.19.
10. Stepanov A.P., Stepanov M.A. Sposob magnitnoi defektoskopii protyazhennykh ferromagnitnykh konstruktivnykh [The method of magnetic flaw detection of extended ferromagnetic structures]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2012. No.1(33). P. 69.
11. Stepanov M.A. Sposob magnitnoi defektoskopii ferromagnitnykh konstruktivnykh, nakhodyashchikhsya v napryazhennom sostoyanii [The method of magnetic flaw detection of ferromagnetic structures in tension]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2012. No.4(36). P. 154.
12. Stepanov A.P., Stepanov M.A. Metod magnitnogo kontrolya i diagnostiki napryazhennogo sostoyaniya elementov stal'nykh konstruktivnykh, imeyushchikh osesimmetrichnoe sechenie [The method of magnetic control and diagnostics of the stress state of elements of steel structures having an axisymmetric section]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2016. No. 1 (49). P. 60.
13. Soproivlenie materialov: Uchebnik dlya vuzov [Resistance of materials: a textbook for universities]. In gen. ed. of Pisarenko G. S., an Academy Member of the Academy of Sciences of USSR. 4th ed., revised and enlarged. Kiev: Vishcha shkola. Golovnoe izd-vo Publ., 1979. 696 p.
14. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: Elektromagnitnoe pole [Theoretical Foundations of Electrical Engineering: Electromagnetic Field]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1978. 231p.
15. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki [Theoretical Foundations of Electrical Engineering]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1978. 528 p.
16. Kifer I.I., Pantyushin V.S. Ispytaniya ferromagnitnykh materialov [Tests of ferromagnetic materials]. Moscow: Gosenergoizdat Publ., 1955. 240 p.

## Информация об авторах

*Степанов Максим Александрович* – к. т. н., доцент кафедры «Электроэнергетика транспорта», Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: Stepanov\_MA@irgups.ru.

*Степанов Александр Петрович* – к. т. н., доцент, профессор кафедры «Электроэнергетика транспорта», Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: stap@irgups.ru.

## Authors

*Maksim Alexandrovich Stepanov* – Ph.D. of Engineering Science, Assoc. Prof. at the Subdepartment of Electric Power Engineering in Transport, Irkutsk State Transport University, e-mail: Stepanov\_MA@irgups.ru

*Aleksandr Petrovich Stepanov* – Ph.D. of Engineering Science, Assoc. Prof., Professor of the Subdepartment of Electric Power Engineering in Transport, Irkutsk State Transport University, e-mail: stap@irgups.ru.



## Для цитирования

Степанов М. А. Оценка распределения изгибных напряжений и дефектов внутри симметричных поперечных сечений стальной балки / М. А. Степанов, А. П. Степанов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 22–31. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).22–31

## For citation

Stepanov M. A., Stepanov A. P. Otsenka raspredeleniya izgibnykh napryazhenii i defektov vnutri simmetrichnykh poperechnykh sechenii stal'noi balki [Estimation of the distribution of flexural stresses and defects inside symmetrical cross-sections of a steel beam]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2019. Vol. 63, No. 3, pp. 22–31. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).22–31

УДК 621.398

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).31–37

## И. А. Щербатов

Московский энергетический институт, г. Москва, Российская Федерация

Дата поступления: 14 мая 2019 г.

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РЕМОНТАМИ ПРЕДПРИЯТИЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

**Аннотация.** В статье отмечается необходимость разработки метрических показателей оценки степени интеллектуальности информационных систем управления ремонтами, направленных на повышение эффективности планирования и реализации ремонтных программ предприятий энергетики. Показано, что за счет применения методов искусственного интеллекта существует возможность реализации мощных программных продуктов и систем, использующих функционал мониторинга, диагностики, прогнозирования и принятия решений в области применения стратегии ремонта энергетического оборудования по его фактическому техническому состоянию. Использование данных методов приводит к автономности и интеллектуальности функционирования систем управления ремонтами, поэтому актуальной является задача разработки соответствующих метрических показателей, которые позволят оценить степень интеллектуальности разрабатываемых и используемых информационных систем предприятий энергетики. В работе приводятся такие показатели и представлен расчетный пример, демонстрирующий последовательность соответствующих расчетов. Сформулированы рекомендации по применению метрических показателей оценки степени интеллектуальности систем управления ремонтами предприятий энергетики.

**Ключевые слова:** система управления ремонтами, энергетика, интеллектуальная система, информационная система, автономность, компонента, нечеткие множества.

## I. A. Shcherbatov

Moscow Power Engineering Institute, Moscow, the Russian Federation

Received: May 14, 2019

**INTELLECTUALIZATION OF INFORMATION FOR POWER PLANTS REPAIR MANAGEMENT SYSTEMS**

**Abstract.** The paper highlights the need to develop metric indicators to assess the degree of information management systems repairs intelligence, which are aimed at improving the efficiency of planning and implementation of energy enterprises repair programs. It is shown that due to the use of artificial intelligence methods, it is possible to implement powerful software products and systems that employ the functionality of monitoring, diagnosis, forecasting and decision-making in the field of energy equipment repair strategy according to its actual technical condition. The use of these methods leads to the autonomy and intelligence of the repair management systems operation, so the actual task is to develop appropriate metric indicators that would allow assessing the degree of intelligence of the developed and used information systems of energy enterprises. The paper shows such indicators and provides an example of the design, demonstrating the sequence of the corresponding calculations. The recommendations on the use of metric indicators to assess the degree of intelligence of management systems of energy enterprises are formulated.

**Keywords:** repair management system, energy, intelligent system, information system, autonomy, component, fuzzy sets.

**Введение**

Поддержание оборудования предприятий энергетики в надлежащем техническом состоянии обеспечивает бесперебойные поставки энергии (как тепловой, так и электрической) потребителям,

а также организацию безаварийной эксплуатации объектов энергетики, что является крайне важной задачей в силу их высокой опасности. Процесс обеспечения заданной надежности и требуемого технического состояния энергетического оборудо-