

УДК 621.179.14

**В. А. Новиков, д-р техн. наук, проф., Г. И. Скрыбина, канд. техн. наук, доц.,
А. В. Шилов, А. В. Кушнер**

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВЫПУКЛОСТИ СВАРНОГО ШВА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НОРМАЛЬНОЙ И ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩИМИ ВНЕШНЕГО ПОЛЯ

Рассмотрены вопросы формирования магнитостатического поля в зоне сварного соединения при намагничивании полем, направленным параллельно и перпендикулярно поверхности контролируемого изделия.

Для повышения достоверности магнитографического контроля стыковых сварных соединений необходимо отстроиться от полей, обусловленных наличием выпуклости сварного шва. Результаты теоретических и экспериментальных исследований магнитостатических полей на поверхности выпуклости шва при намагничивании полем, направленным параллельно поверхности контролируемого изделия, приведены в [1-3]. Расширить возможности магнитографического метода контроля позволяет применение для намагничивания вместо электромагнита постоянного малогабаритного магнита в форме параллелепипеда, перемещаемого непосредственно над контролируемой поверхностью, на которой уложена магнитная лента, и обращенного к ней гранью с одним полюсом [4]. В этом случае первичное поле \overline{H}_0 в зоне контроля становится неоднородным и содержит как нормальную, так и тангенциальную составляющие.

Исследование магнитостатического поля выпуклости сварного шва выполнено в [5] для случая, когда первичное поле направлено нормально к поверхности изделия. Выполним исследование топографии магнитостатического поля, обусловленного валиком бездефектного шва, на поверхности сварного соединения при действии нормальной H_{0x} и тангенциальной H_{0y} составляющих первичного поля.

Примем допущение, что сварной шов выполнен на поверхности ферромагнитной плиты из низкоуглеродистой стали, что позволяет пренебречь влиянием химической и структурной неоднородностей на магнитные свойства шва и околошовной зоны. Пусть высота валика шва c , ширина b (рис. 1). Внешнее поле направлено под углом к поверхности плиты. Положение декартовой системы координат приведено на рис. 1. При этом ось Z направлена вдоль продольной оси шва.

Разделив высоту усиления шва плоскостями, параллельными XZ , на $(c/c_1) \cdot n$ равных частей, где $c_1 = 1$ мм, используем для анализа аппроксимацию поверхности усиления шва ломаной поверхностью $ABCDE$ [1] (см. рис. 1). При намагничивании перпендикулярным полем внешним полем на ее поверхности ($|x| > b/2$) и на всех плоскостях ломанной поверхности, параллельных XZ , возникают отрицательные связанные «магнитные заряды» с плотностью $\sigma_1 = k \cdot H_{0y} = \sigma \cdot \sin\beta$. Так как величину нормальной составляющей H_{0y} первичного поля под полюсом магнита можно в первом приближении считать постоянной, то величину σ_1 можно принять неизменной на всех горизонтальных площадках. На всех вертикальных гранях ломанной поверхности, параллельных YZ , возникают положительные «заряды» с поверхностной плотностью $\sigma_{2k} = k \cdot H_{0xk} = \sigma \cdot \cos\beta$, величина которой зависит от расстояния b_k от оси Y до k -й площадки, так как величина тангенциальной

составляющей первичного поля H_{ox} изменяется по ширине полюса по линейному закону и равна нулю при $x = 0$.

Методика расчета аналогична [1, 5].

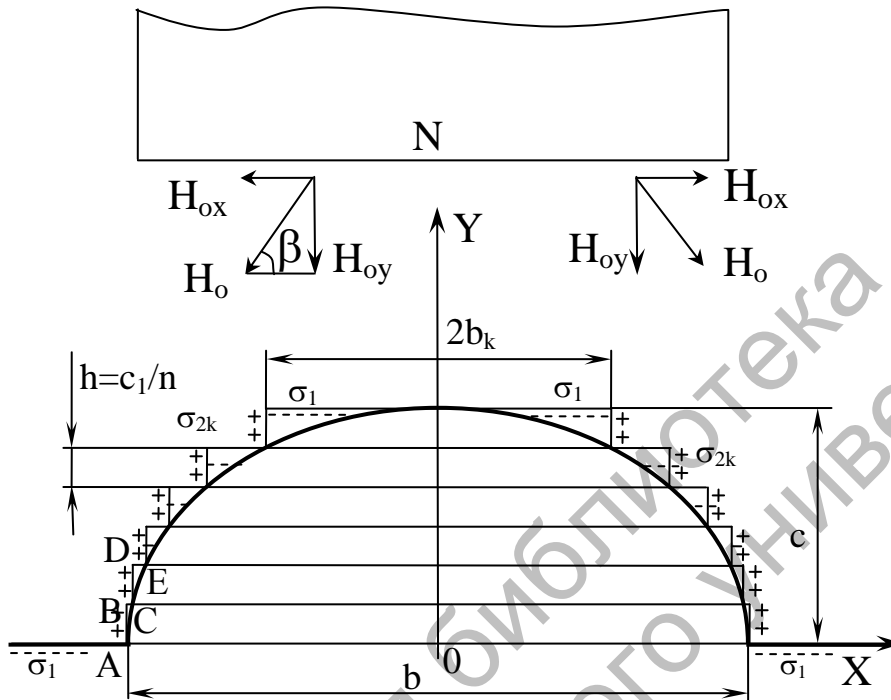


Рис. 1. Расчетная модель

Тангенциальная H_x и нормальная H_y составляющие напряженности поля в произвольной точке определяются суммированием соответственно H_{xi} и H_{yi} составляющих поля от действия «магнитных зарядов» каждого из участков расчетной модели [1, 5]. Составляющие напряженности поля, обусловленные плотностью зарядов σ_1 на горизонтальных участках плиты при $-\infty \leq x_1 \leq -b/2$ и $b/2 \leq x_1 \leq \infty$, определяются как

$$dH_{x1} = -2\sigma_1 \frac{x - x_1}{(x - x_1)^2 + y^2} dx_1; \quad (1)$$

$$dH_{y1} = -2\sigma_1 \frac{y}{(x - x_1)^2 + y^2} dx_1. \quad (2)$$

От заряженного элемента dx_{2k} k -й горизонтальной площадки при $-b_k \leq x_{2k} \leq -b_{k+1}$ и $b_{k+1} \leq x_{2k} \leq b_k$

$$dH_{x2k} = -2\sigma_1 \frac{x - x_{2k}}{(x - x_{2k})^2 + (y - y_k)^2} dx_{2k}; \quad (3)$$

$$dH_{y2k} = -2\sigma_1 \frac{y - y_k}{(x - x_{2k})^2 + (y - y_k)^2} dx_{2k}. \quad (4)$$

От заряженного элемента $d\eta$ k -й вертикальной площадки слева при $-b/2 \leq x_{2k} \leq 0$

$$dH_{x3k}^{лев} = 2\sigma_{2k} \frac{x + b_k}{(x + b_k)^2 + (y - y_k + \eta)^2} d\eta; \quad (5)$$

$$dH_{y3k}^{лев} = 2\sigma_{2k} \frac{y - y_k + \eta}{(x + b_k)^2 + (y - y_k + \eta)^2} d\eta. \quad (6)$$

От заряженного элемента $d\eta$ k -й вертикальной площадки справа при $0 \leq x_{2k} \leq b/2$

$$dH_{x3k}^{np} = 2\sigma_{2k} \frac{x - b_k}{(x - b_k)^2 + (y - y_k + \eta)^2} d\eta; \quad (7)$$

$$dH_{y3k}^{np} = 2\sigma_{2k} \frac{y - y_k + \eta}{(x - b_k)^2 + (y - y_k + \eta)^2} d\eta, \quad (8)$$

где

$$y_k = k \frac{c_1}{n}, \text{ при } |x| < b/2;$$

$$y_k = -k \frac{c_1}{n}, \text{ при } |x| \geq b/2.$$

После интегрирования выражений (1)–(4) по x в указанных пределах, а выражений (5)–(8) по η в пределах от 0 до h и их суммирования получим:

$$H_{x \infty} = \sigma_1 \left\{ \ln \frac{(x + b/2)^2 + y^2}{(x - b/2)^2 + y^2} + \sum_{k=1}^{k=c_1 \frac{n}{n}} \ln \frac{[(x + b_{k+1})^2 + (y - y_k)^2] \cdot [(x - b_k)^2 + (y - y_k)^2]}{[(x + b_k)^2 + (y - y_k)^2] \cdot [(x - b_{k+1})^2 + (y - y_k)^2]} \right\} +$$

$$+ 2 \sum_{k=1}^{k=c_1 \frac{n}{n}} \sigma_{2k} \left[\operatorname{arctg} \frac{\frac{c_1}{n} (x + b_k)}{(x + b_k)^2 + (y - y_k)(y - y_k + \frac{c_1}{n})} + \operatorname{arcc} \frac{\frac{c_1}{n} (x - b_k)}{(x - b_k)^2 + (y - y_k)(y - y_k + \frac{c_1}{n})} \right]; \quad (9)$$

$$H_{y \infty} = \sigma_1 \left\{ \operatorname{arctg} \frac{b \cdot y}{y^2 + x^2 - b^2/4} + 2 \sum_{k=1}^{k=c_1 \frac{n}{n}} \left[\operatorname{arctg} \frac{(b_{k+1} - b_k)(y - y_k)}{(y - y_k)^2 + (x + b_{k+1})(x + b_k)} + \operatorname{arctg} \frac{(b_{k+1} - b_k)(y - y_k)}{(y - y_k)^2 + (x - b_{k+1})(x - b_k)} \right] \right\} +$$

$$+ \sum_{k=1}^{k=c_1 \frac{n}{n}} \sigma_{2k} \ln \frac{[(x + b_k)^2 + (y - y_k + \frac{c_1}{n})^2] \cdot [(x - b_k)^2 + (y - y_k + \frac{c_1}{n})^2]}{[(x + b_k)^2 + (y - y_k)^2] \cdot [(x - b_k)^2 + (y - y_k)^2]}. \quad (10)$$

Если аппроксимировать поверхность усиления сварного шва в плоскости, нормальной продольной оси шва, параболой, то b_k и b_{k+1} определяются согласно [1] как

$$b_k = x|_{y=y_k} = \frac{b}{2} \sqrt{1 - k \frac{c_1}{c \cdot n}} \quad (11)$$

и соответственно

$$b_{k+1} = x|_{y=y_{k+1}} = \frac{b}{2} \sqrt{1 - (k+1) \frac{c_1}{c \cdot n}}. \quad (12)$$

Зависимости (9) и (10) позволяют определить тангенциальную $H_{x\ominus}$ и нормальную $H_{y\ominus}$ составляющие напряженности магнитного поля за пределами шва, так как в этом случае оси τ и n совпадают с X и Y . На поверхности сварного соединения ($|x| < b/2$) ось τ направлена по касательной к выпуклости шва [1, 5] и образует с осью X угол $\alpha(x)$. В этом случае тангенциальная и нормальная составляющие поля выпуклости шва на поверхности соединения определяются из выражений:

$$H_{\tau\ominus} = H_{x\ominus} \cos \alpha(x) - H_{y\ominus} \sin \alpha(x); \quad (13)$$

$$H_{n\ominus} = H_{x\ominus} \sin \alpha(x) - H_{y\ominus} \cos \alpha(x). \quad (14)$$

Результаты расчета тангенциальной составляющей поля выпуклости шва при намагничивании объекта направленным под углом к поверхности первичным полем представлены на рис. 2.

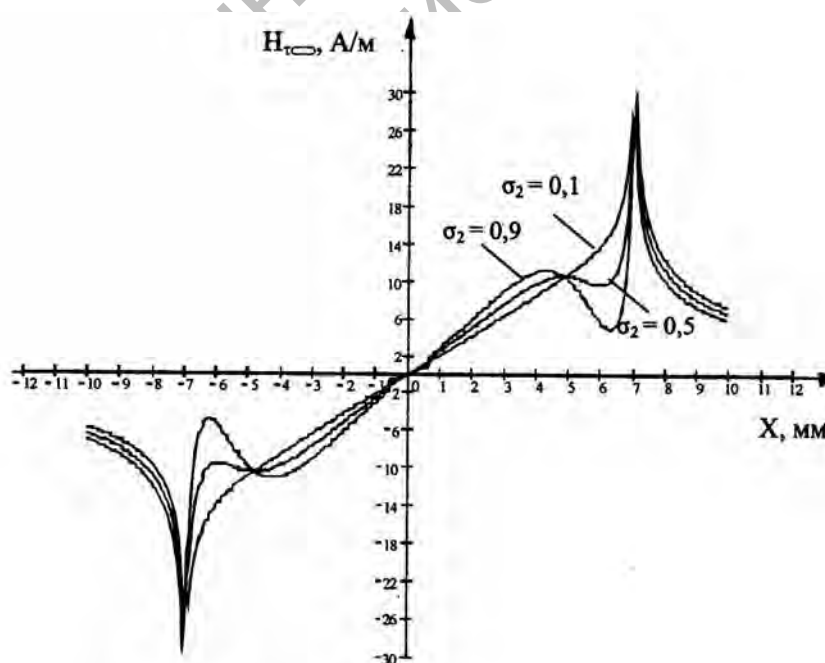


Рис. 2. Зависимость тангенциальной составляющей на поверхности сварного соединения от условий намагничивания $b = 14$ мм, $c = 2$ мм, $\sigma_1 = 1,5$ А/м, $\sigma_2 = 0,1; 0,5; 0,9$ А/м

Для оценки полученных аналитических зависимостей были произведены экспериментальные исследования топографии тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности выпуклости сварного шва, так как именно эта составляющая поля записывается на магнитную ленту. Для создания намагничивающего поля, направленного под углом к поверхности исследуемого образца, использовали постоянный магнит. Образец был выполнен в виде стальной плиты с наплавленным на ее поверхность валиком шва. Для измерения напряженности магнитного поля использовали миллитесламетр ИОН-3. Результаты измерений представлены на рис. 3. Как видно из рисунка, они достаточно хорошо согласуются с результатами расчета.

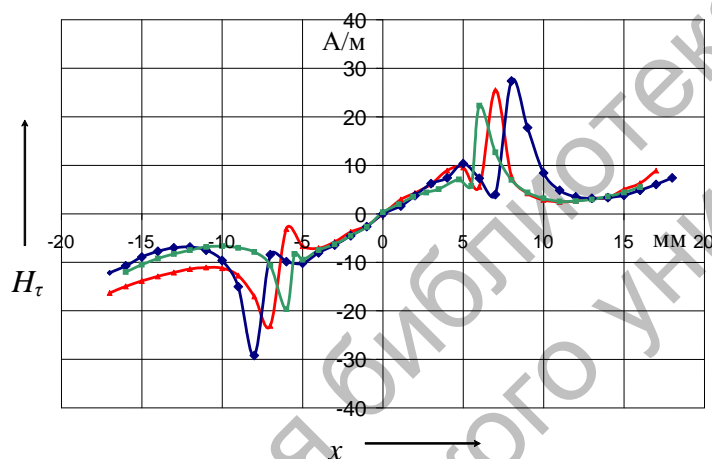


Рис. 3. Экспериментальная топография тангенциальной составляющей поля выпуклости шва, обусловленная нормальной и тангенциальной составляющими внешнего магнитного поля: 1) $b = 11$ мм; $c = 1,5$ мм; 2) $b = 12,5$ мм; $c = 1,7$ мм; 3) $b = 14$ мм; $c = 3$ мм

Таким образом, на основании результатов расчета и эксперимента установлено, что при намагничивании объекта одновременно перпендикулярно и параллельно его поверхности тангенциальная составляющая поля выпуклости шва имеет кососимметричный вид, напоминающий синусоиду. Изменение параметров выпуклости шва не приводит к изменению поля в плоскости ее симметрии. Увеличение горизонтальной составляющей первичного поля, что равносильно росту σ_2 , приводит к увеличению модуля напряженности $H_{\tau \square}$ в средней части шва (*но не в плоскости симметрии*) и к ее уменьшению при приближении к краям шва.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Новиков, В. А.** Особенности формирования магнитостатического поля валика шва на поверхности стыкового сварного соединения / В. А. Новиков // Диагностика и проектирование разрушения сварных конструкций. – 1988. – № 6. – С. 53-60.
2. **Шарова, А. М.** Топография поля дефекта на поверхности стыкового сварного шва / А. М. Шарова, В. А. Новиков // Дефектоскопия. – 1981. – № 5. – С. 71-78.
3. **Шур, М. Л.** Теоретическое и экспериментальное исследование тангенциальной составляющей поля валика усиления сварного шва / М. Л. Шур, С. Л. Ваулин, В. Е. Щербинин // Дефектоскопия. – 1981. – № 10. – С. 59-71.

4. Пат. 2154818 РФ, МКИ⁷ G 01 N 27/85. Способ магнитографического контроля ферромагнитных изделий / В. А. Новиков. – № 96111357/28 ; заявл. 03.06.96 ; опубл. 20.08.2000, Бюл. № 23. – 8 с. : ил.

5. Новиков, В. А. Исследование магнитостатического поля валика усиления сварного шва при нормальном намагничивании объекта / В. А. Новиков, Г. И. Скрыбина, А. В. Шилов // Метрология и приборостроение. – 2004. – № 3. – С. 23-25.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 17.02.2006

**V. A. Novikov, G. I. Skrjabina,
A. V. Shilov, A. V. Kushner**
**Research magnetostatic of the field of camber
of the welded seam at influence by normal
and tangential components of the external field**
Belarusian-Russian University

Questions of formation magnetostatic fields in a zone of welded connection are considered at magnetization by a field directed in parallel and perpendicularly of a surface of a controllable product.