

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 621.179.14

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ И ВЕРТИКАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ НАМАГНИЧИВАЮЩЕГО ПОЛЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЗОНЕ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Рассмотрены вопросы формирования магнитостатического поля в зоне сварного соединения при действии поля постоянного магнита и дополнительного поля электромагнита. Получены математические выражения для расчета нормальной и тангенциальной составляющих магнитного поля на поверхности выпуклости шва и его окрестностях. Выполнены экспериментальные исследования и произведен сравнительный анализ теоретических и экспериментальных результатов.

Большие возможности при реализации магнитографического метода контроля открывает применение для намагничивания вместо традиционно используемых электромагнитов постоянного малогабаритного магнита в форме параллелепипеда, перемещаемого непосредственно над контролируемой поверхностью, на которой уложена магнитная лента [1]. При этом магнит обращен к выпуклости шва гранью с одним полюсом. В этом случае первичное поле \vec{H}_0 в зоне контроля является неоднородным и содержит как нормальную, так и тангенциальную составляющие. Причем, если величину нормальной составляющей H_{0y} первичного поля под полюсом магнита можно считать в первом приближении постоянной, то величина тангенциальной составляющей H_{0x} изменяется по ширине полюса по линейному закону и равна нулю при $x = 0$. Повысить чувствительность метода можно путем применения для намагничивания объекта одновременно с малогабаритным постоянным магнитом дополнительного подмагничивания магнитным полем $H_{од}$, направленным горизонтально поверхности объекта. Результаты исследований магнитостатических полей на поверхности выпуклости шва при намагничи-

вании полем, направленным параллельно поверхности контролируемого изделия, приведены в [2–4], а для случаев намагничивания малогабаритным постоянным магнитом при действии нормальной и тангенциальной составляющих рассмотрены в [5, 6].

Выполним исследование топографии магнитостатического поля, обусловленного валиком бездефектного шва, на поверхности сварного соединения при действии нормальной, тангенциальной составляющих и дополнительного магнитного поля.

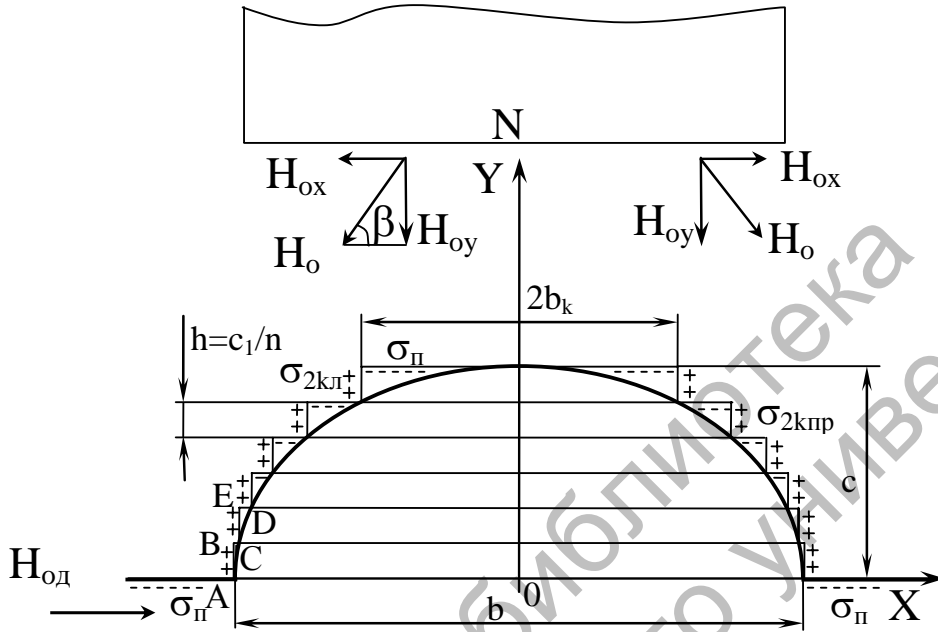
Примем допущение, что сварной шов выполнен на поверхности ферромагнитной плиты из низкоуглеродистой стали, что позволяет пренебречь влиянием химической и структурной неоднородности на магнитные свойства шва и околошовной зоны. Пусть высота выпуклости шва – c , ширина – b (рис. 1, а). Внешнее поле направлено под углом, а дополнительное поле $H_{од}$ параллельно поверхности плиты. Положение декартовой системы координат выберем согласно рис. 1, а. При этом ось Z направлена вдоль продольной оси шва.

Разделив высоту c усиления шва плоскостями, параллельными XZ , на $n \cdot c/c_1$

равных частей, где $c_1 = 1$ мм, используем для анализа аппроксимацию поверхности усиле-

ния шва ломаной поверхностью ABCDE [5, 6] (см. рис. 1, а).

а)



б)

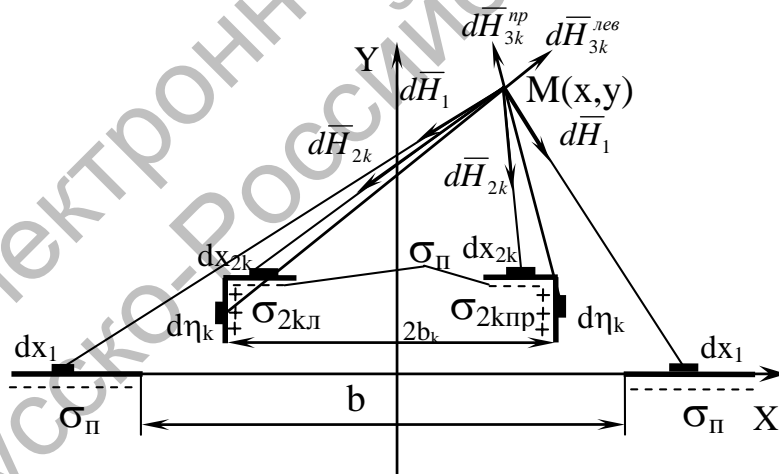


Рис. 1. Расчетная модель: а – аппроксимация поверхности усиления шва; б – формирование поля в произвольной точке М

При намагничивании перпендикулярным полем на ее поверхности ($|x| > b / 2$) и на всех плоскостях ломаной поверхности, параллельных XZ, возникают отрицательные связанные

«магнитные заряды» с плотностью $\sigma_{\pi} = k \cdot H_o = \sigma_{\pi} \cdot \sin \beta$ (см. рис. 1). На вертикальных плоскостях при действии дополнительного магнитного поля, направленного параллельно поверхности

изделия $H_{од}$, в областях $-b/2 < x < 0$ возникает «заряд» с плотностью $\sigma_{2л} = k \cdot (H_{ох} - H_{од})$, а при $0 < x < b/2$ плотность «поверхностных зарядов» $\sigma_{2пр} = k \cdot (H_{ох} + H_{од})$.

Известно, что напряженность магнитного поля $d\bar{H}_k$ в произвольной точке пространства $M(x, y)$ от заряженного элемента dx_i имеет вид

$$d\bar{H}_k = 2\sigma_k \frac{\bar{r}_i}{r_i^2} dx_i, \quad (1)$$

где \bar{r}_i – радиус-вектор от элемента dx_i , проведенный в точку $M(x, y)$.

Тангенциальная H_x и нормальная H_y составляющие напряженности поля определяются суммированием соответственно H_{xi} и H_{yi} от действия «магнитных зарядов» каждого из участков расчетной модели (см. рис. 1, б). Составляющие напряженности поля от σ_1 на горизонтальных участках плиты при $-\infty \leq x_1 \leq -b$ и $b \leq x_1 \leq \infty$ определяются из выражений:

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

$$dH_{y1} = -2\sigma_n \frac{y}{(x - x_1)^2 + y^2} dx_1. \quad (3)$$

От заряженного элемента dx_{2k} k -й горизонтальной площадки:

- при $-b_k \leq x_{2k} \leq -b_{k+1}$ и $b_{k+1} \leq x_{2k} \leq b_k$

$$dH_{x2k} = -2\sigma_n \frac{x - x_{2k}}{(x - x_{2k})^2 + (y - y_k)^2} dx_{2k}; \quad (4)$$

$$dH_{y2k} = -2\sigma_n \frac{y - y_k}{(x - x_1)^2 + (y - y_k)^2} dx_{2k}. \quad (5)$$

От заряженного элемента $d\eta$ k -й вертикальной площадки слева:

- при $-b/2 \leq x_{2k} \leq 0$ и $0 \leq \eta_k \leq h$

$$dH_{x3k}^{лев} = 2\sigma_{2kl} \frac{x + b_k}{(x + b_k)^2 + (y - y_k + \eta_k)^2} d\eta_k; \quad (6)$$

$$dH_{y3k}^{лев} = 2\sigma_{2kl} \frac{y - y_k + \eta}{(x + b_k)^2 + (y - y_k - \eta)^2} d\eta_k. \quad (7)$$

От заряженного элемента $d\eta$ k -й вертикальной площадки справа:

- при $0 \leq x_{2k} \leq b/2$ и $0 \leq \eta_k \leq h$

$$dH_{x3k}^{пр} = 2\sigma_{2kpr} \frac{x - b_k}{(x - b_k)^2 + (y - y_k + \eta_k)^2} d\eta_k; \quad (8)$$

$$dH_{y3k}^{пр} = 2\sigma_{2kpr} \frac{y - y_k + \eta}{(x - b_k)^2 + (y - y_k - \eta)^2} d\eta_k, \quad (9)$$

где $y_k = k \frac{c_1}{n}$ при $|x| < b/2$; $y_k = -k \frac{c_1}{n}$ при $|x| \geq b/2$.

После интегрирования выражений (2)–(9) в указанных пределах и их суммирования получим:

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

$$+ 2 \sum_{k=1}^{k=c \cdot \frac{n}{c_1}} \left[\sigma_{2kl} \operatorname{arctg} \frac{\frac{c_1}{n}(x + b_{k+1})}{(x + b_k)^2 + (y - y_k)(y - y_k + \frac{c_1}{n})^2} + \sigma_{2kpr} \operatorname{arctg} \frac{\frac{c_1}{n}(x - b_{k+1})}{(x - b_k)^2 + (y - y_k)(y - y_k + \frac{c_1}{n})^2} \right]; \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 H_{y_{\square}} = & 2\sigma_{II} \left\{ \operatorname{arctg} \frac{b \cdot y}{y^2 + x^2 - b^2/4} + \sum_{k=1}^{k=c-\frac{n}{c_1}} \left[\operatorname{arctg} \frac{(b_{k+1} - b_k)(y - y_k)}{(y - y_k)^2 - (x + b_{k+1})(x + b_k)} + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \operatorname{arctg} \frac{(b_{k+1} - b_k)(y - y_k)}{(y - y_k)^2 - (x - b_{k+1})(x - b_k)} \right] + \sum_{k=1}^{k=c-\frac{n}{c_1}} \left[\sigma_{kI} \ln \frac{(x + b_k)^2 + \left(y - y_k + \frac{c_1}{n} \right)^2}{(x + b_k)^2 + (y - y_k)^2} + \right. \\
 & \left. \left. + \sigma_{kII} \ln \frac{(x - b_k)^2 + \left(y - y_k + \frac{c_1}{n} \right)^2}{(x - b_k)^2 + (y - y_k)^2} \right] \right\}. \tag{11}
 \end{aligned}$$

Зависимости (10), (11) [5] позволяют определить тангенциальную $H_{\tau} = H_{x_{\square}}$ и нормальную $H_n = H_{y_{\square}}$ составляющие напряженности магнитного поля за пределами шва. 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 и образует с осью X угол $\alpha(x)$. Тогда тангенциальная и нормальная составляющие поля выпуклости шва на поверхности соединения определяются по методике, приведенной в [5, 6].

Результаты расчета тангенциальной составляющей поля выпуклости шва при намагничивании объекта нормально, тангенциально и дополнительным полем представлены на рис. 2.

Для оценки полученных аналитических зависимостей были произведены экспериментальные исследования топографии тангенциальной составляющей магнитного поля на поверхности выпуклости сварного шва, так как именно эта составляющая поля записывается на магнитную ленту, уложенную на поверхность шва, при магнитографическом контроле.

Для создания первичного магнитного поля, направленного нормально и тангенциально поверхности исследуемого образца, применяли постоянный магнит. Дополнительное магнитное поле $H_{од}$ создавали приставным электромагнитом с П-образным сердечником. Образец был выполнен в виде стальной плиты с наплавленным на ее поверх-

ность валиком шва.

Таким образом, на основании результатов расчета и эксперимента установлено, что распределение тангенциальной составляющей напряженности поля выпуклости шва имеет вид кососимметричной кривой с двумя экстремумами у краев выпуклости шва. Дополнительное внешнее поле приводит к смещению указанной кривой по оси ординат в положительную или отрицательную сторону в зависимости от направления и величины дополнительного поля (рис. 3). Полученные результаты говорят о том, что выбранная схема намагничивания в целом является нерациональной, т. к. сварной шов в поперечном направлении оказывается намагниченным неравномерно, что снижает достоверность контроля. Для повышения однородности магнитного поля предложено намагничивать объект перемещаемым постоянным магнитом в поперечном направлении.

Ниже для сравнения приведены результаты экспериментальных исследований при намагничивании сварного соединения, имеющего выпуклость шва, перпендикулярно, а также перпендикулярно и параллельно его поверхности. Схема экспериментальной установки для намагничивания образца полем, направленным перпендикулярно его поверхности, приведена на рис. 4.

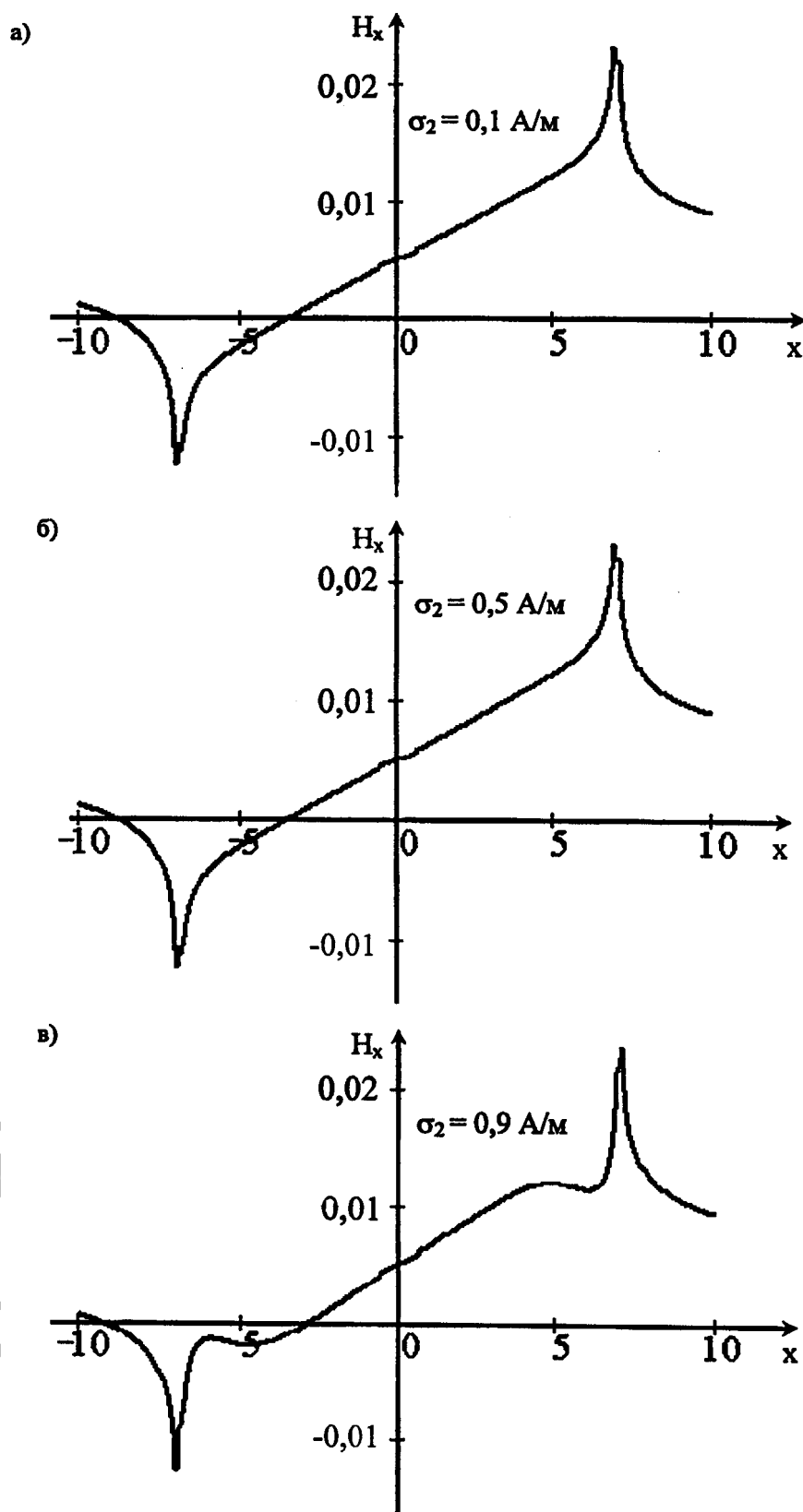


Рис. 2. Зависимость тангенциальной составляющей магнитного поля на поверхности сварного соединения от условий намагничивания для шва с параметрами выпуклости $b = 14 \text{ мм}$, $c = 2 \text{ мм}$, $\sigma_1 = 1,5 \text{ A/м}$: а – $\sigma_2 = 0,1 \text{ A/м}$; б – $\sigma_2 = 0,5 \text{ A/м}$; в – $\sigma_2 = 0,9 \text{ A/м}$

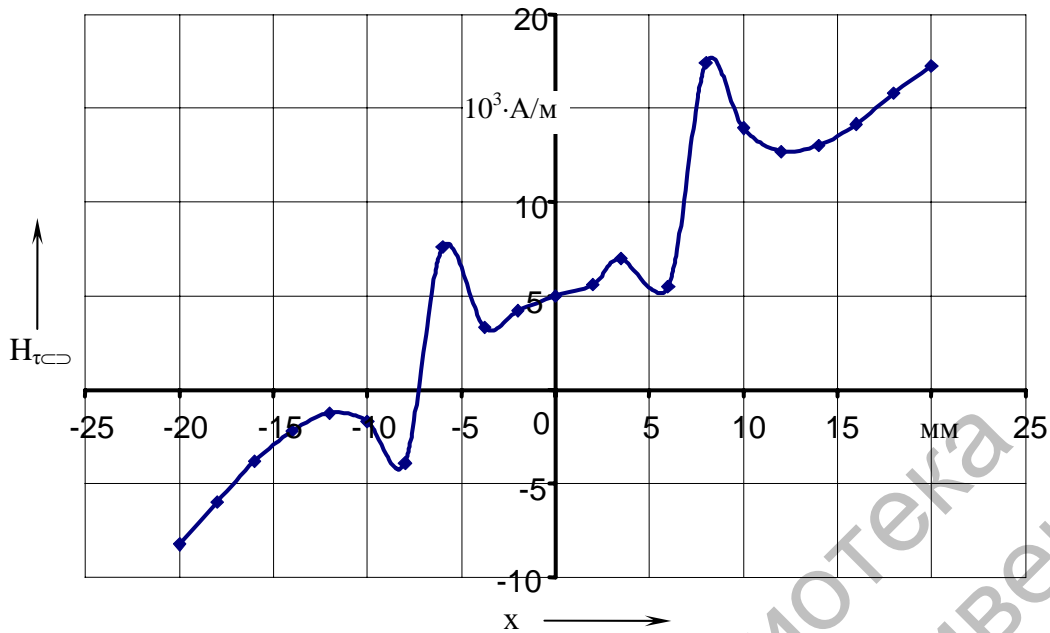


Рис. 3. Экспериментальная топография тангенциальной составляющей поля выпуклости шва вблизи поверхности качественного сварного соединения при действии горизонтальной, вертикальной составляющих напряженности и дополнительного внешнего поля (параметры выпуклости шва: высота $c = 2$ мм, ширина $b = 14$ мм)

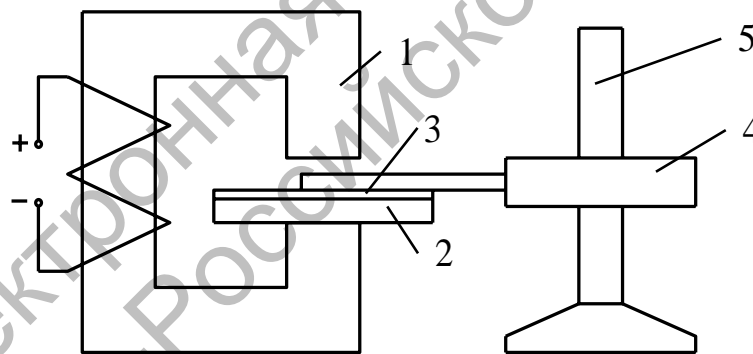


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: 1 – электромагнит; 2 – сварной образец; 3 – усиление сварного шва; 4 – преобразователь; 5 – штатив

Для создания первичного магнитного поля, направленного нормально поверхности исследуемого образца, применяли электромагнит 1, ширина полюсов которого была значительно больше ширины шва $2a \gg b$ (см. рис. 4).

Образец был выполнен в виде стальной плиты с наплавленным на ее поверхность валиком шва. В качестве индикатора магнитного поля использовали преобразователь Холла. Размеры арматуры шу-

па не позволяли измерить магнитную индукцию непосредственно на исследуемой поверхности. Поэтому тангенциальную составляющую результирующего магнитного поля измеряли на расстоянии $\delta = 2,5$ мм от поверхности. Величину напряженности магнитоэстатического поля $H_{тс}(x)$ валика шва определяли как разность напряженности тангенциальной составляющей поля вблизи поверхности сварного шва и на-

пряженности поля в той же точке между полюсами электромагнита без образца. Полученная экспериментальная кривая приведена на рис. 5, из которого видно,

что тангенциальная составляющая поля выпуклости бездефектного шва несколько напоминает синусоиду, причем в плоскости симметрии шва $H_{\tau\infty}(x) = 0$.

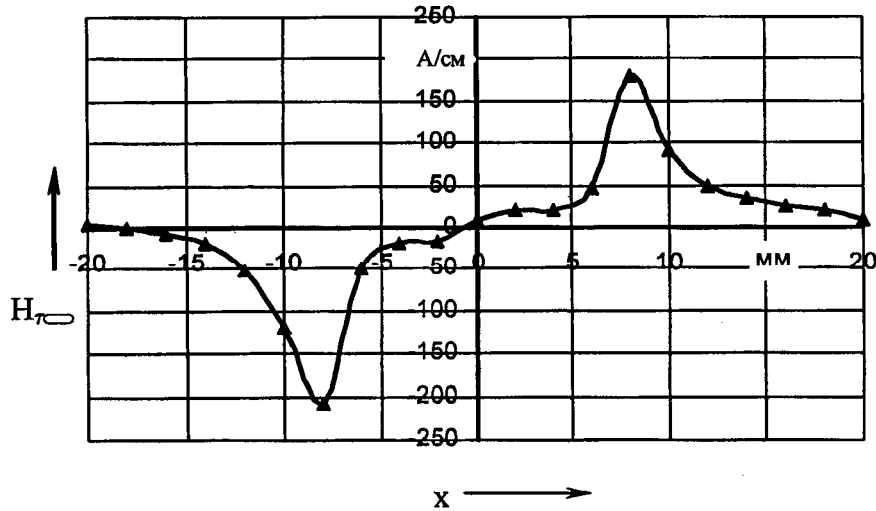


Рис. 5. Экспериментальная топография тангенциальной составляющей поля выпуклости шва вблизи поверхности качественного сварного соединения, обусловленная нормальной составляющей внешнего магнитного поля (высота выпуклости шва $c = 2$ мм, ширина $b = 12$ мм)

При намагничивании сварного соединения, имеющего выпуклость шва, перпендикулярно и параллельно его поверхности (намагничивание постоянным магнитом в форме параллелепипеда, об-

ращенного к объекту гранью с одним полюсом) тангенциальная составляющая поля выпуклости шва также имеет кососимметричный вид (рис. 6).

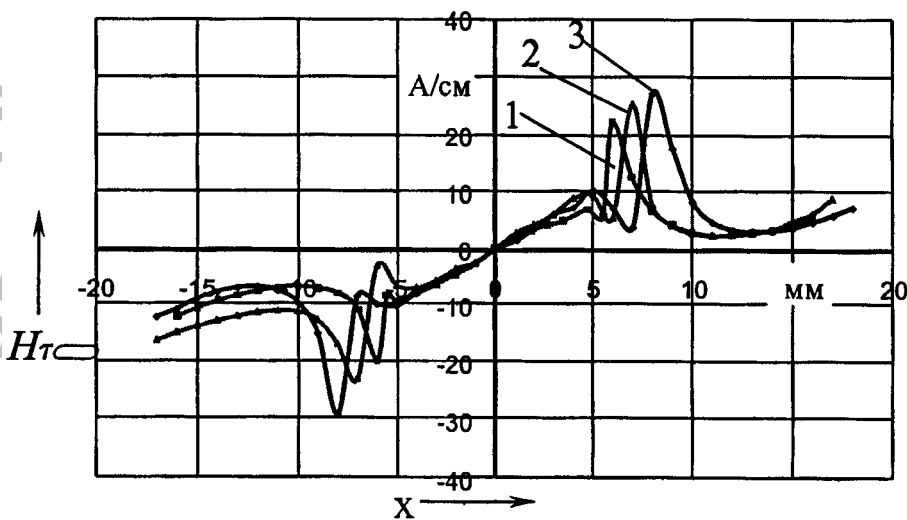


Рис. 6. Экспериментальная топография тангенциальной составляющей поля выпуклости шва, обусловленная нормальной и тангенциальными составляющими внешнего магнитного поля: 1 – $b = 11$ мм, $c = 1,5$ мм; 2 – $b = 12,5$ мм, $c = 1,7$ мм; 3 – $b = 14$ мм, $c = 3$ мм

Изменение параметров выпуклости шва не приводит к изменению поля в плоскости симметрии шва. Увеличение горизонтальной составляющей первичного поля, что равносильно росту σ_2 , приводит к увеличению модуля напряженности поля $H_{\tau\infty}$ в средней части шва и к его уменьшению при приближении к краям шва.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2154818 РФ, МКИ⁷ G 01 N 27/85. Способ магнитографического контроля ферромагнитных изделий / В. А. Новиков ; заявитель и патентообладатель Белорус.-Рос. ун-т. – № 96111357/28 ; заявл. 03.06.96 ; опубл. 20.08.2000, Бюл. № 23. – 8 с. : ил.
2. 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.

3. Шарова, А. М. Топография поля дефекта на поверхности стыкового сварного шва / А. М. Шарова, В. А. Новиков // Дефектоскопия. – 1981. – № 5. – С. 71–78.

4. 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.

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

6. Новиков, В. А. Исследование магнитостатического поля выпуклости сварного шва при воздействии нормальной и тангенциальной составляющими внешнего поля / В. А. Новиков, Г. И. Скрябина, А. В. Шилов // Вестн. МГТУ. – 2006. – № 2. – С. 139–144.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 08.01.2008

V. A. Novikov, G. I. Skrjabina,
A. V. Shilov, A. V. Kushner
Research of influence of horizontal and vertical components of the magnetizing field on formation of the magnetic field in the zone of welded connection

Questions of formation of magnetostatic field in a zone of the weld at a field action of a constant magnet and an additional magnetic bias of a zone of the testing have been considered. Mathematical expressions for calculation of normal and tangential components of a magnetic field on a surface of camber of a seam and its vicinities have been received. Experimental researches have been executed and the comparative analysis of theoretical and experimental results has been made.