

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ОБРАТНОЙ ВЫПУКЛОСТИ ШВА, СМЕЩЕННОЙ ОТНОСИТЕЛЬНО ПЛОСКОСТИ СИММЕТРИИ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

А.В. Щербашина, Н.Н. Закаблукова, В.А.Новиков

В статье проанализированы типовые детали вертолета МИ-8, характерные их дефекты и применяемые методы неразрушающего контроля, выполнен расчет соленоида для намагничивания (и размагничивания) мелких деталей, описана разработанная установка для дефектоскопии типовых деталей вертолета МИ-8.

Ключевые слова: магнитографический контроль; расчет магнитостатических полей; «метод магнитных зарядов».

При магнитографическом контроле стыковых сварных соединений изделий из низкоуглеродистых и ряда низколегированных сталей на магнитную ленту записывается в основном суперпозиция магнитных полей следующих видов: тангенциальные составляющие внешнего поля, поля наружной и внутренней выпуклости сварного шва и поля дефекта. Для учета влияния смещения обратной выпуклости шва на формирование магнитного поля в контролируемой зоне произведем расчет напряженности поля, создаваемого обратной выпуклостью шва, на наружной поверхности сварного соединения. Примем следующие допущения. Две пластины из ферромагнитного материала сварены двусторонним швом. Высота наружного валика шва c_1 , ширина – b_1 , высота обратного валика шва – c_2 , ширина – b_2 . Магнитные проницаемости металла шва и основного металла одинаковые. Влиянием химической и структурной неоднородности на магнитные свойства шва и околошовной зоны можно пренебречь. Объект окружен воздухом и намагничивается постоянным однородным полем, направленным перпендикулярно плоскости симметрии шва. Необходимо произвести расчет тангенциальной составляющей магнитостатического поля, обусловленного обратной выпуклостью шва, смещенной относительно плоскости симметрии наружной выпуклости сварного соединения, для случая, когда размеры наружного и обратного валиков шва одинаковые. Результирующее поле \vec{H}_p на поверхности бездефектного сварного шва равновекторной сумме внешнего поля \vec{H}_0 и полей валиков шва $\vec{H}_{с\rightarrow н}$, $\vec{H}_{с\rightarrow вн}$:

$$\vec{H}_p = \vec{H}_0 + \vec{H}_{с\rightarrow н} + \vec{H}_{с\rightarrow вн}. \quad (1)$$

Поле $\vec{H}_{с\rightarrow вн}$ обусловлено действием «магнитных зарядов», образующихся на поверхности обратной выпуклости шва при намагничивании сварного соединения. Если бы эту поверхность образца можно было аппроксимировать поверхностью эллипсоида, то $\vec{H}_{с\rightarrow вн}$ можно было бы определить $\vec{H}_{с\rightarrow вн} = -N\vec{M}_{с\rightarrow вн}$, где N - размагничивающий фактор, имеющий для эллипсоида постоянное значение, M - намагниченность. Однако поверхность усиления шва только при большой ширине шва можно с достаточно хорошей точностью описать частью поверхности эллипсоида.

Введем систему координат XYZ , как показано на *рис. 1*. Ось X расположена в плоскости чертежа и совпадает с поверхностью изделия, ось Y находится в плоскости симметрии шва, Z направлена вдоль продольной оси шва.

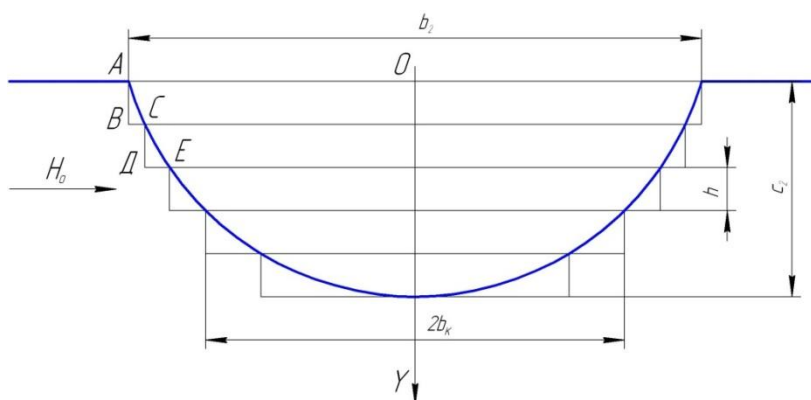


Рис. 1. Аппроксимация поверхности усиления обратного валика шва при расчете создаваемого им поля на поверхности сварного соединения

Высоту c_2 обратной выпуклости шва разделим на $\frac{c_2}{c_0} \cdot n$ равных частей плоскостями, параллельными XZ . Здесь $c_0 = 1$ мм и введена, чтобы убрать размерность входящих величин. n – целое положительное число. При достаточно большом n поверхность усиления шва можно с хорошей точностью аппроксимировать некоторой ломаной поверхностью $ABCDE\dots$ (рис. 1). На ней криволинейные участки поверхности усиления шва, заключенные между соседними параллельными плоскостями, заменены плоскостями, параллельными YZ и XZ . Например, участок поверхности в плоскости чертежа, ограниченный точками A и C , – плоскостями, определяемыми следами AB и BC . Если внешнее магнитное поле направлено параллельно поверхности плиты XZ , то на всех плоскостях ломаной поверхности, параллельных YZ , образуются «магнитные заряды». На плоскостях, параллельных XZ , «магнитные заряды» от внешнего намагничивающего поля не возникают, так как поле направлено параллельно этим граням. «Магнитные заряды» здесь образуются только от вторичного поля заряженных граней и настолько малы, что их действием можно пренебречь. Две заряженные грани, заключенные между соседними k и $(k+1)$ -й параллельными плоскостями, образуют ленточный диполь шириной $2b_k$ высотой $h = \frac{c}{c_0 \cdot n} = \frac{c_0}{n}$. Напряженность поля в точке M от действия «магнитных зарядов», расположенных на гранях k -го диполя, равна векторной сумме напряженностей, создаваемых левой H_k^l и правой H_k^r гранями: $\vec{\Delta H}_k = \vec{\Delta H}_k^l + \vec{\Delta H}_k^r$.

Известны формулы для расчета составляющих поля ленточного диполя для случая, когда высота граней диполя, нормальных к внешнему полю, много больше расстояния между ними. В этом случае можно считать, что плотность «магнитных зарядов» на гранях, нормальных к внешнему полю, постоянна. Модель выбрана для поверхностных дефектов с малым раскрытием и проверялась применительно к магнитно-порошковому методу контроля, при котором действуют слабые намагничивающие поля. При магнитографическом контроле сварных соединений, имеющих валик шва, создают напряженность намагничивающего поля в сотни ампер на сантиметр. Допустим, что при таких режимах намагничивания плотность «магнитных зарядов» на гранях аппроксимирующей поверхности, нормальных к внешнему полю, также будет постоянной. Тогда составляющие поля ленточного диполя в системе координат XYZ (рис. 2) принимают вид, представленный в формулах (2), (3).

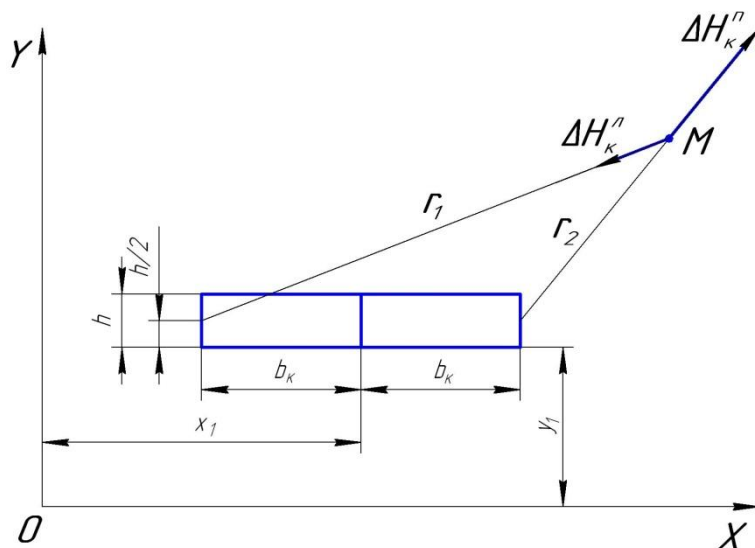


Рис. 2. Формирование поля ленточного диполя в точке М

$$\Delta H_{xk} = -2\sigma_n \cdot \left(\operatorname{arctg} \frac{h \cdot (x - x_1 + b_k)}{(x - x_1 + b_k)^2 + (y - y_1) \cdot (y - y_1 - h)} - \operatorname{arctg} \frac{h(x - x_1 - b_k)}{(x - x_1 - b_k)^2 + (y - y_1) \cdot (y - y_1 - h)} \right), \quad (2)$$

$$\Delta H_{yk} = -\sigma_n \cdot \ln \frac{((x - x_1 + b_k)^2 + (y - y_1 - h)^2) \cdot ((x - x_1 - b_k)^2 + (y - y_1)^2)}{((x - x_1 - b_k)^2 + (y - y_1)^2) \cdot ((x - x_1 - b_k)^2 + (y - y_1 - h)^2)}. \quad (3)$$

Знак «минус» обусловлен тем, что на выступающих и внутренних одноименных (левых и правых) гранях знаки «магнитных зарядов» противоположны (рис. 3).

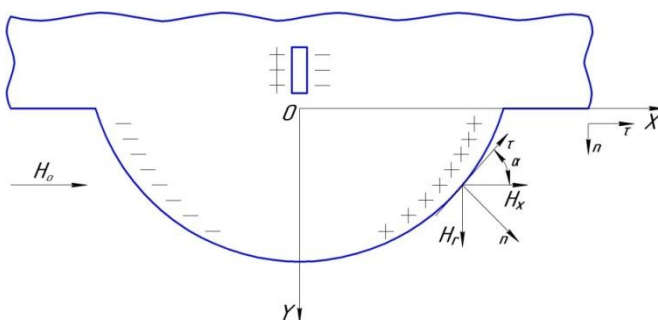


Рис. 3. Выбор систем координат при расчете поля обратного валика шва

Суммируя напряженности магнитного поля в точке М, обусловленные всеми гранями для конкретных точек, можно получить выражение, определяющее топографию поля валика шва на поверхности сварного соединения.

$$\vec{H}_{\ominus M} = \sum_{k=1}^{k=\frac{c}{c_0} \cdot n} (\Delta \vec{H}_{kM}^n + \Delta \vec{H}_{kM}^n) = \sum_{k=1}^{k=\frac{c}{c_0} \cdot n} \Delta \vec{H}_{kM}, \quad (4)$$

где ΔH_k^l , ΔH_k^n , ΔH_k - напряженности поля, обусловленные соответственно k -йлевой и k -йправой гранями, k -мленточным диполем (рис. 1, 2).

При магнитографическом контроле на магнитную ленту записывается в основном составляющая поля, направленная по касательной к поверхности ленты в конкретной точке. При этом известно, что в силу непрерывности тангенциальной составляющей поля при переходе границы раздела сред значение H_τ на ленте и в поверхностном слое металла одинаковы. Поэтому введем новую систему координат $nO_{1\tau}$ (рис. 3). Начало координат совпадает с исследуемой точкой и находится на поверхности сварного соединения (точки O_1 и M совпадают).

При $|x| \leq \frac{b_2}{2}$ ось τ направлена по касательной к поверхности валика шва и образует с осью Хугол α . За пределами шва оси τ и n совпадают с X и Y .

Для тангенциальной и нормальной составляющих поля валика шва на поверхности соединения получим следующие выражения:

$$H_{\tau \ominus}(X) = \sum_{k=1}^{k=\frac{c}{c_0} \cdot n} (\Delta H_{xk}(x) \cdot \cos \alpha(x) - \Delta H_{yk}(x) \cdot \sin \alpha(x)); \quad (5)$$

$$H_{n \ominus}(X) = \sum_{k=1}^{k=\frac{c}{c_0} \cdot n} (\Delta H_{xk}(x) \cdot \sin \alpha(x) + \Delta H_{yk}(x) \cdot \cos \alpha(x)). \quad (6)$$

где $\Delta H_{xk}(x)$, $\Delta H_{yk}(x)$ - составляющие напряженности магнитного поля, обусловленного k -мленточным диполем, а при достаточно большом n - линейным:

$$\Delta H_{xk}(x) = \frac{-4\sigma_l \cdot b_k \cdot ((x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 - b_k^2)}{((x-x_1+b_k)^2 + (y-y_1)^2) \cdot ((x-x_1-b_k)^2 + (y-y_1)^2)}, \quad (7)$$

$$\Delta H_{yk}(x) = \frac{-8\sigma_l \cdot b_k \cdot (x-x_1) \cdot (y-y_1)}{((x-x_1+b_k)^2 + (y-y_1)^2) \cdot ((x-x_1-b_k)^2 + (y-y_1)^2)}, \quad (8)$$

где линейная плотность «зарядов»

$$\sigma_l = \lim_{h \rightarrow 0} \sigma_n h, \quad (9)$$

$$y = \begin{cases} Y + S + \frac{c_0}{n} \cdot k, & |X| < \frac{b_2}{2}, \\ S + \frac{c_0}{n} \cdot k, & |X| \geq \frac{b_2}{2}, \end{cases} \quad (10)$$

так как составляющие $H_{\tau \ominus}$ и $H_{n \ominus}$ определяли на поверхности сварного соединения, то

$$b_k = X \Big|_{Y=Y_r} = \frac{b_2}{2} \sqrt{1 - k \cdot \frac{c_0}{c_2 \cdot n}}, \quad (11)$$

где $Y_k = k \cdot \frac{c_0}{n}$ - ордината k -го линейного диполя.

Поверхность выпуклости сварного шва в плоскости, нормальной его продольной оси, аппроксимировали параболой:

$$Y = c_2 - \frac{4c_2}{b_2^2} \cdot X^2. \quad (12)$$

В выражениях (5) и (6) $\alpha(X)$ - угол между осью X и касательной к параболе в точке с абсциссой X

$$\sin \alpha(X) = \pm \frac{8c_2 \cdot X}{b_2^2 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{8c_2}{b_2^2} \cdot X\right)^2}}, \quad \cos \alpha(X) = \pm \frac{1}{b_2^2 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{8c_2}{b_2^2} \cdot X\right)^2}} \quad (13, 14)$$

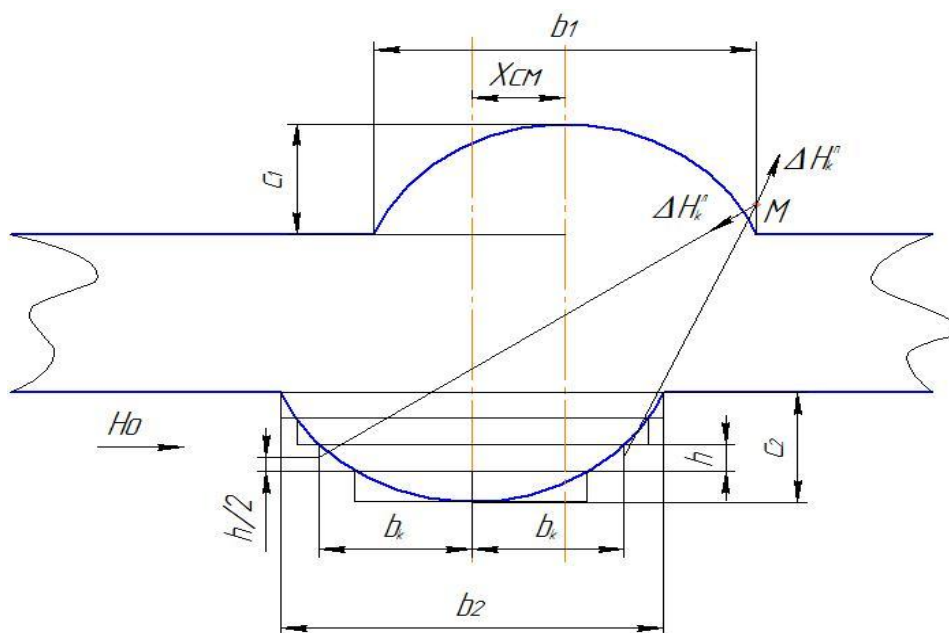


Рис. 4. К расчету поля ленточного диполя в точке М

Подставляя в формулы (5) и (6) данные из выражений (7 - 14), получим окончательные выражения для определения тангенциальной и нормальной составляющих поля обратного валика шва для $|X| \leq \frac{b_2}{2}$:

$$H_{\tau \square}(X) = \sum_{k=1}^{k=\frac{c_0}{n}} \pm \frac{2\sigma_1 \cdot b_2 \sqrt{1 - k \cdot \frac{c_0}{c_2 \cdot n} \cdot \left(-X^2 + \left(c_2 - \frac{4c_2}{b_2^2} \cdot X^2 + S + k \cdot \frac{c_0}{n}\right)^2 + \right)}}{\left(\left(X^2 + \frac{b_2^2}{4} \left(1 - k \cdot \frac{c_0}{c_2 \cdot n}\right)\right) + \left(c_2 - \frac{4c_2}{b_2^2} \cdot X^2 + S + k \cdot \frac{c_0}{n}\right)^2 - \right)}$$

$$\frac{+\frac{b_2^2}{4} \cdot (1 - k \cdot \frac{c_0}{c_2 \cdot n}) + \frac{16c_2 \cdot X^2}{b_2^2} \cdot (c_2 - \frac{4c_2}{b_2^2} \cdot X^2 + S + k \cdot \frac{c_0}{n})}{-b_2^2 \cdot (1 - k \cdot \frac{c_0}{c_2 \cdot n}) \cdot X^2} \cdot \sqrt{1 + (\frac{8c_2 \cdot X}{b_2^2})^2}, \quad (15)$$

$$H_{n\equiv}(X) = \sum_{k=1}^{k-\frac{c_2}{c_0}n} \pm \frac{2\sigma_x \cdot b_2 \sqrt{1 - k \cdot \frac{c_0}{c_2 \cdot n} \cdot (X^2 - (c_2 - \frac{4c_2}{b_2^2} \cdot X^2 + S + k \cdot \frac{c_0}{n})^2 - \frac{b_2^2}{4} \cdot (1 - k \cdot \frac{c_0}{c_2 \cdot n}) \cdot X^2}}{((X^2 + \frac{b_2^2}{4} (1 - k \cdot \frac{c_0}{c_2 \cdot n}) + (c_2 - \frac{4c_2}{b_2^2} \cdot X^2 + S + k \cdot \frac{c_0}{n})^2)^2 - \frac{b_2^2}{4} \cdot (1 - k \cdot \frac{c_0}{c_2 \cdot n}) \cdot \frac{8c_2 \cdot X}{b_2^2} + 2X}} \cdot \sqrt{1 + (\frac{8c_2 \cdot X}{b_2^2})^2}. \quad (16)$$

Верхние знаки в выражениях для $H_{\tau\equiv}(X)$ и $H_{n\equiv}(X)$ берут, когда $0 \leq X \leq \frac{b}{2}$,
нижние - когда $-\frac{b}{2} \leq X \leq 0$.

На поверхности сварного соединения вне шва $|X| > \frac{b_2}{2}$ имеем:

$$H_{\tau\equiv}(X) = \sum_{k=1}^{k-\frac{c_2}{c_0}n} - \frac{2\sigma_x \cdot b_2 \sqrt{1 - k \cdot \frac{c_0}{c_2 \cdot n} \cdot (X^2 - (S + k \cdot \frac{c_0}{n})^2 - \frac{b_2^2}{4} \cdot (1 - k \cdot \frac{c_0}{c_2 \cdot n}))}}{(X^2 + (S + k \cdot \frac{c_0}{n})^2 + \frac{b_2^2}{4} \cdot (1 - k \cdot \frac{c_0}{c_2 \cdot n}))^2 - b_2^2 \cdot (1 - k \cdot \frac{c_0}{c_2 \cdot n}) \cdot X^2}, \quad (17)$$

$$H_{n\equiv}(X) = \sum_{k=1}^{k-\frac{c_2}{c_0}n} \frac{4\sigma_x \cdot b_2 \sqrt{1 - k \cdot \frac{c_0}{c_2 \cdot n} \cdot X \cdot k \cdot \frac{c_0}{n}}}{(X^2 + (S + k \cdot \frac{c_0}{n})^2 + \frac{b_2^2}{4} \cdot (1 - k \cdot \frac{c_0}{c_2 \cdot n}))^2 - b_2^2 \cdot (1 - k \cdot \frac{c_0}{c_2 \cdot n}) \cdot X^2}, \quad (18)$$

где $X = x - x_{cm}$, а x_{cm} - смещение обратного валика шва относительно плоскости симметрии.

Для обратного валика шва $x_{cm} = b/6$, $x_{cm} = b/3$ и $x_{cm} = b/2$, а для наружного валика шва $x_{cm} = 0$.

Выражения для определения тангенциальной и нормальной составляющих поля наружного валика шва на поверхности сварного соединения:

$$H_{\tau_{\infty}}(X) = \sum_{k=1}^{k=\frac{c_1}{c_0} \cdot n} - \frac{2\sigma_s \cdot b_1 \sqrt{1 - k \cdot \frac{c_0}{c_1 \cdot n} \cdot (X^2 - (k \cdot \frac{c_0}{n})^2 - \frac{b_1^2}{4} \cdot (1 - k \cdot \frac{c_0}{c_1 \cdot n}))}}{(X^2 + (k \cdot \frac{c_0}{n})^2 + \frac{b_1^2}{4} \cdot (1 - k \cdot \frac{c_0}{c_1 \cdot n}))^2 - b_1^2 \cdot (1 - k \cdot \frac{c_0}{c_1 \cdot n}) \cdot X^2} \quad (19)$$

$$H_{n_{\infty}}(X) = \sum_{k=1}^{k=\frac{c_1}{c_0} \cdot n} \frac{4\sigma_s \cdot b_1 \sqrt{1 - k \cdot \frac{c_0}{c_1 \cdot n} \cdot X \cdot k \cdot \frac{c_0}{n}}}{(X^2 + (k \cdot \frac{c_0}{n})^2 + \frac{b_1^2}{4} \cdot (1 - k \cdot \frac{c_0}{c_1 \cdot n}))^2 - b_1^2 \cdot (1 - k \cdot \frac{c_0}{c_1 \cdot n}) \cdot X^2} \quad (20)$$

Для обратного валика шва $x_{cm}=b/6$, $x_{cm}=b/3$ и $x_{cm}=b/2$, а для наружного валика шва $x_{cm}=0$.

Рассмотрим влияние смещения обратного валика шва относительно плоскости симметрии. Разберем несколько случаев: при x_{cm} равно $b/6$, $b/3$ и $b/2$, с разными параметрами сварных швов, b и c наружного и обратного валиков равны.

На рис. 5 показана топография тангенциальной составляющей суперпозиции полей, обусловленных наружным и обратным валиками шва. При толщине металла $S=4$ мм, ширине сварного шва $b=15$ мм, смещение $x_{cm}=b/6$, при высоте c 1 кривая – 0,5 мм, 2 – 1 мм, 3 – 1,5 мм, 4 – 2 мм, 5 – 2,5 мм, 6 – 3 мм.

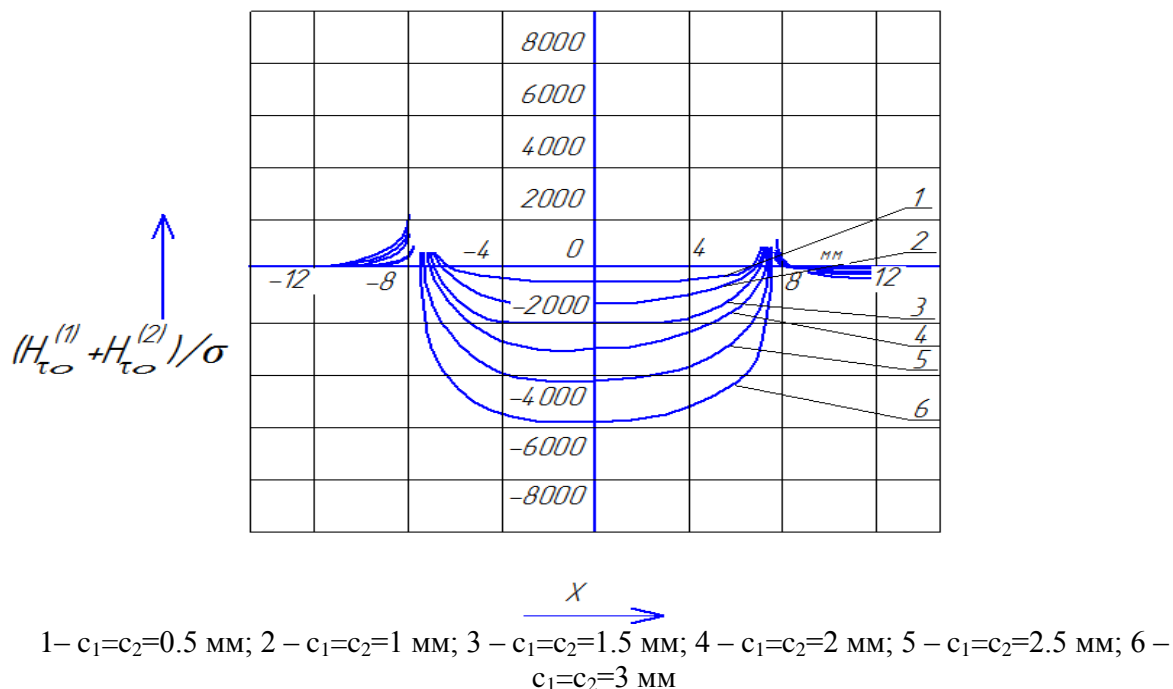
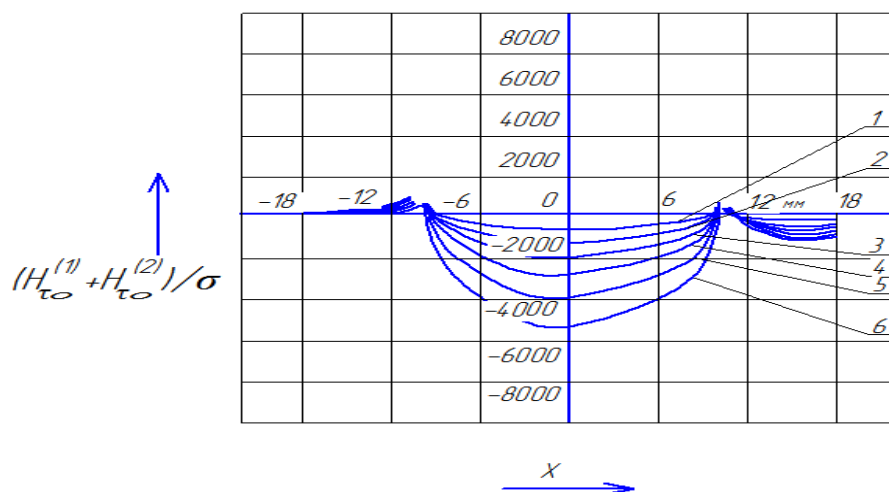


Рис. 5. Топография суперпозиции полей, обусловленных наружным и обратным валиками шва ($b_1=b_2=15$ мм, $S=4$ мм), на поверхности сварного соединения при смещении $x_{cm}=b/6$

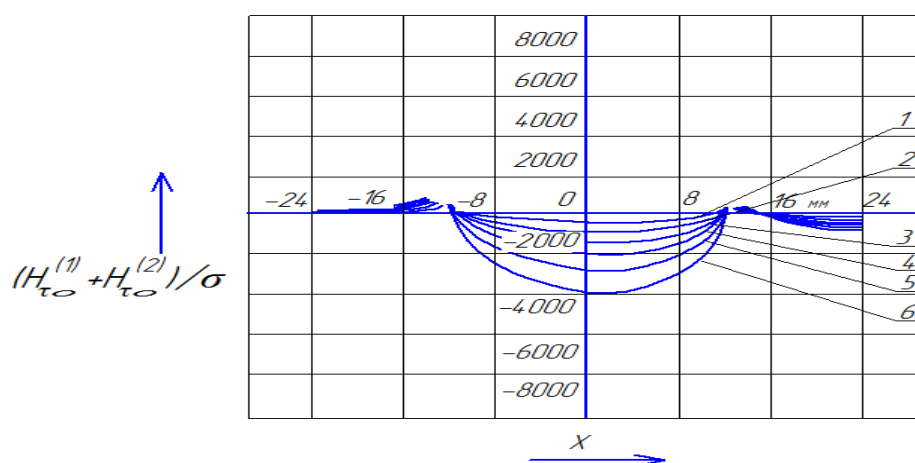
На рис. 6 приведена топография тангенциальной составляющей суперпозиции полей, обусловленных наружным и обратным валиками шва. При толщине металла $S=4$ мм, ширине сварного шва $b=20$ мм, смещении обратного валика шва $x_{cm}=b/3$, при высоте $c_1 = c_2 - 1$ кривая – 0,5 мм, 2 – 1 мм, 3 – 1,5 мм, 4 – 2 мм, 5 – 2,5 мм, 6 – 3 мм.



1 – $c_1=c_2=0.5$ мм; 2 – $c_1=c_2=1$ мм; 3 – $c_1=c_2=1.5$ мм; 4 – $c_1=c_2=2$ мм; 5 – $c_1=c_2=2.5$ мм; 6 – $c_1=c_2=3$ мм

Рис. 6. Топография суперпозиции полей, обусловленных наружным и обратным валиками шва ($b_1=b_2=20$ мм, $S=4$ мм), на поверхности сварного соединения при смещении $x_{cm}=b/3$

На рис. 7 приведена топография тангенциальной составляющей суперпозиции полей, обусловленных наружным и обратным валиками шва. При толщине металла $S=6$ мм, ширине сварного шва $b=25$ мм, смещении обратного валика шва $x_{cm}=b/2$, при высоте $c_1 = c_2 - 1$ кривая – 0,5 мм, 2 – 1 мм, 3 – 1,5 мм, 4 – 2 мм, 5 – 2,5 мм, 6 – 3 мм.



1 – $c_1=c_2=0.5$ мм; 2 – $c_1=c_2=1$ мм; 3 – $c_1=c_2=1.5$ мм; 4 – $c_1=c_2=2$ мм; 5 – $c_1=c_2=2.5$ мм; 6 – $c_1=c_2=3$ мм

Рис. 7 – Топография суперпозиции полей, обусловленных наружным и обратным валиками шва ($b_1=b_2=25$ мм, $S=6$ мм), на поверхности сварного соединения при смещении $x_{cm}=b/2$

На кривых отчетливо обнаруживаются изгибы, соответствующие краям обратного валика шва, что должно сказаться и на топографии результирующего поля на поверхности сварного соединения и привести к помехам при контроле реальных объектов.

Таким образом, расчетным путем показано, что при поперечном намагничивании сварного соединения обратный валик шва, как и наружный, создает поле, направленное навстречу внешнему полю, однако его размагничивающее действие на поверхности наружного валика значительно меньше размагничивающего действия наружного валика шва. Смещение обратного валика приводит к нарушению симметрии топографии тангенциальной составляющей суперпозиции поля наружного и внутреннего валика и может привести к появлению помех на сигналограмме при магнитографическом контроле сварных соединений.

Щербашина Анна Викторовна

Магистрантка электротехнического факультета
Белорусско-Российский университет, г. Могилев
Тел.: (029) -848-66-649

Закаблуква Наталья Николаевна

Студентка электротехнического факультета
Белорусско-Российский университет, г. Могилев
Тел.: (029) 245-57-79.

E-mail: natalya_zakablukova@mail.ru

Новиков Владимир Алексеевич

Профессор кафедры «Физические методы контроля», д-р техн. наук.
Белорусско-Российский университет, г. Могилев
Тел.: (029) 245-26-19

E-mail: novikovva@tut.by