

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-2-104-114

УДК 620.179.14

В. Г. ПАНТЮШИНА

В. А. НОВИКОВ, *д-р техн. наук, проф.*

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ФОРМИРОВАНИЕ МАГНИТОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ОСТАЮЩЕЙСЯ ПОДКЛАДКИ В ЗОНЕ СТЫКОВОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Аннотация

Исследованы особенности формирования магнитостатического поля остающейся подкладки в зоне стыкового сварного соединения при намагничивании сварного шва в поперечном направлении в процессе магнитографического контроля. При расчете учитывали толщину стенки свариваемых деталей и размеры подкладки. Произведено сравнение размагничивающего действия подкладки при наличии и отсутствии выпуклости шва. Даны рекомендации по выбору размеров подкладок.

Ключевые слова:

магнитный контроль, метод «магнитных зарядов», стыковой шов, параметры подкладки, выпуклость шва.

Для цитирования:

Пантюшина, В. Г. Формирование магнитостатического поля остающейся подкладки в зоне стыкового сварного соединения / В. Г. Пантюшина, В. А. Новиков // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 2 (83). – С. 104–114.

Введение

Стыковые сварные соединения, выполненные на остающейся подкладке, как правило, гарантируют полное проплавление металла в зоне свариваемых

деталей, однако не исключают появления трещин в местах перехода шва через зазор между подкладкой и основным металлом, особенно в объектах, испытывающих динамические нагрузки (рис. 1).

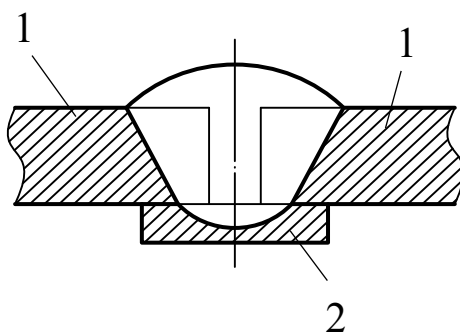


Рис. 1. Вид сварного соединения, выполненного на остающейся подкладке: 1 – свариваемые пластины; 2 – остающаяся подкладка

Данные соединения могут выполняться при ручной дуговой сварке, сварке в среде углекислого газа, под флюсом, при сварке трубопроводов [1–4]. Чаще всего такие соединения вы-

полняют в объектах цилиндрической формы (ресиверах, баллонах, некоторых элементах резервуаров с плоским днищем и т. д.). Для обнаружения дефектов сплошности в таких объектах далеко

не всегда можно использовать широко применяемые акустические и радиационные методы контроля. Это обусловлено тем, что часто ресиверы имеют малую толщину стенки (до 5 мм), кроме того, места перехода шва через зазор между подкладкой и основным металлом создают дополнительные помехи при акустическом контроле и на их фоне весьма сложно обнаружить возникающие в этих зонах трещины.

Радиационные методы контроля, как правило, не гарантируют обнаружение трещин малого раскрытия и даже трещин большой ширины, если направление просвечивания не совпадает с фронтом раскрытия дефекта. Кроме того, в ряде случаев может отсутствовать подход к обратной стороне объекта, что не позволит расположить на ней рентгеновскую пленку.

По этой причине наиболее рационально для таких целей использовать магнитографический метод контроля. При поперечном намагничивании шва в процессе неразрушающего контроля в области сварного соединения возникает суперпозиция магнитных полей следующих видов: внешнее поле, поле выпуклости шва, поле подкладки, поле дефекта. Стандарты регламентируют только минимальные размеры подклад-

ки. Ввиду этого целесообразно сначала оценить вклад подкладки с учетом ее размеров и толщины свариваемых листов в формировании магнитостатического поля в зоне сварного соединения при наличии и отсутствии выпуклости шва.

Основная часть

Произведем расчет магнитостатического поля подкладки для случаев, когда выпуклость шва отсутствует и при ее наличии, и сравним результаты.

Случай 1. Выпуклость шва отсутствует.

При выполнении расчета примем следующие допущения. Остающаяся подкладка имеет вид параллелепипеда высотой h и шириной 2Δ , плоскости которого перпендикулярны и параллельны обратной стороне свариваемых пластин толщиной s , и располагается симметрично относительно плоскости симметрии стыкового шва. Наличием зазора между подкладкой и поверхностями свариваемых пластин можно пренебречь. Вектор напряженности намагничивающего поля перпендикулярен плоскости симметрии шва и узкой грани подкладки. Расчетная схема представлена на рис. 2.

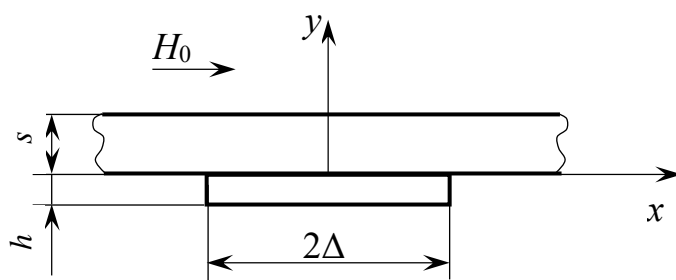


Рис. 2. Расчетная схема: s – толщина пластины; h – толщина подкладки; 2Δ – ширина подкладки; H_0 – напряженность внешнего поля

Расчет выполним методом «магнитных зарядов». Метод разработан применительно к исследованию полей

несплошностей в ферромагнитных объектах. Его сущность состоит в том, что магнитостатическое поле, создаваемое

магнитными полюсами, возникающими на боковых поверхностях несплошностей в намагниченном объекте, аппроксимируют полем эквивалентного магнитного диполя (точечного, линейного или ленточного). В данном случае на боковых гранях остающейся подкладки, находящейся в приложенном поле, также возникают магнитные полюсы. По-

этому можно воспользоваться известной формулой, полученной для поля протяженного дефекта шириной 2Δ и высотой h [5], но со знаком «минус», т. к. на выступающих гранях подкладки, в отличие от граней несплошности, образуются «магнитные заряды» противоположного знака:

$$H_x = 2\sigma_n \left[\operatorname{arctg} \frac{h(x + \Delta)}{(x + \Delta)^2 + y(y + h)} - \operatorname{arctg} \frac{h(x - \Delta)}{(x - \Delta)^2 + y(y + h)} \right], \quad (1)$$

где h – глубина несплошности; 2Δ – ее ширина; σ_n – поверхностная плотность «магнитных зарядов».

$H_x/2\sigma_n$ на поверхности пластины толщиной s поперек подкладки толщиной h можно найти по формуле

Характер изменения отношения

$$\frac{H_x}{2\sigma_n} = \operatorname{arctg} \frac{h(x - \Delta)}{(x - \Delta)^2 + s(s + h)} - \operatorname{arctg} \frac{h(x + \Delta)}{(x + \Delta)^2 + s(s + h)}, \quad (2)$$

где s – толщина пластины; h – толщина подкладки; 2Δ – ширина подкладки.

толщиной $s = 2$ мм при изменении ширины подкладки $2\Delta = 6, 12, \dots, 48$ мм толщиной $h = 3$ мм и отсутствии выпуклости сварного шва. Из рисунка видно, что чем меньше ширина подкладки, тем большее размагничивающее действие она оказывает.

Результаты расчетов представлены на рис. 3–7.

На рис. 3 изображено семейство кривых, показывающих характер изменения $H_x/2\sigma_n$ на поверхности пластин

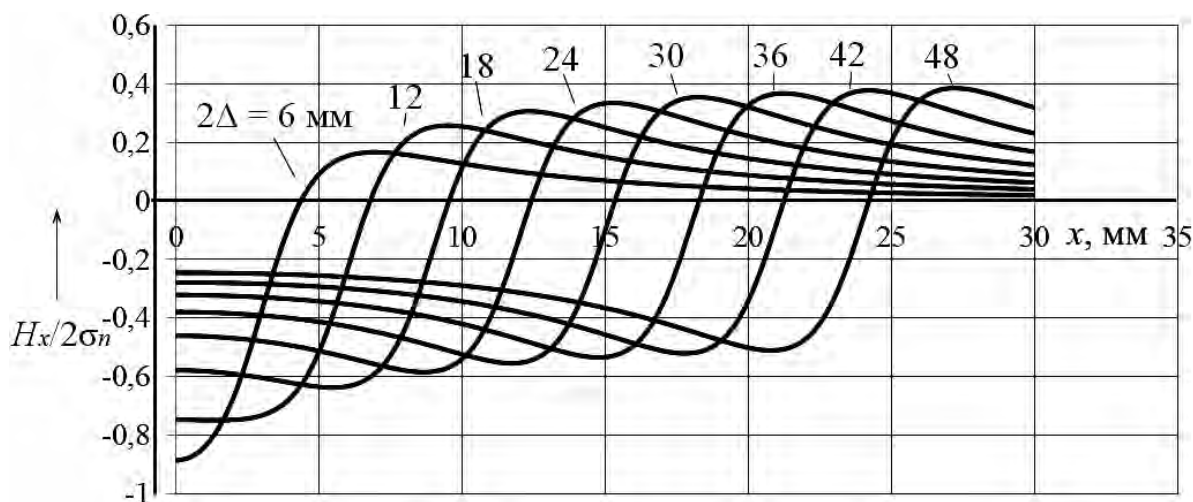


Рис. 3. Характер изменения $H_x/2\sigma_n$ на поверхности пластин толщиной $s = 2$ мм при отсутствии выпуклости сварного шва: ширина подкладки $2\Delta = 6, 12, \dots, 48$ мм; толщина подкладки $h = 3$ мм; σ_n – поверхностная плотность «магнитных зарядов»; H_x – горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля подкладки

Так, при увеличении ширины подкладки от 6 до 24 мм ее размагничивающее действие в плоскости симметрии подкладки на поверхности объекта уменьшается в 2 раза, а при увеличении до 48 мм – в 4 раза. Наибольшее размагничивающее действие наблюдается на расстоянии около 4 мм от ее боковых граней внутрь подкладки, при этом снаружи этих граней поле подкладки воз-

растает до некоторого значения, а затем плавно уменьшается.

На рис. 4 представлено семейство кривых, показывающих характер изменения $H_x/2\sigma_n$ на поверхности пластин толщиной $s = 2, 4, \dots, 12$ мм при ширине подкладки $2\Delta = 30$ мм, ее толщине $h = 3$ мм и отсутствии выпуклости сварного шва.

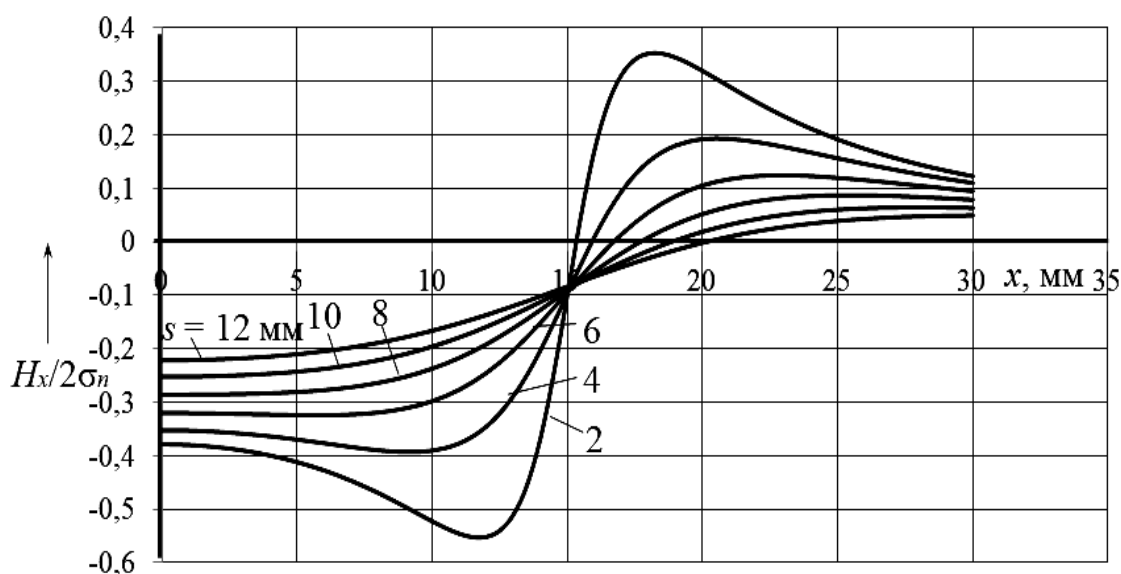


Рис. 4. Характер изменения $H_x/2\sigma_n$ на поверхности сварного соединения пластин толщиной $s = 2, 4, \dots, 12$ мм при отсутствии выпуклости сварного шва: ширина подкладки $2\Delta = 30$ мм; толщина подкладки $h = 3$ мм; σ_n – поверхностная плотность «магнитных зарядов»; H_x – горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля подкладки

Как видно из рисунка, с увеличением толщины s пластины размагничивающее действие подкладки снижается. Так, при уменьшении s от 12 до 2 значения $H_x/2\sigma_n$ увеличиваются по модулю приблизительно в 1,5 раза. Следует отметить, что расстояния до экстремальных значений поля подкладки по обе стороны боковых граней увеличиваются по мере роста толщины пластины и при $s > 6$ эти экстремумы уже не просматриваются.

На рис. 5 изображено семейство кривых, показывающих характер изменения $H_x/2\sigma_n$ на поверхности пластин толщиной s при ширине подкладки

$2\Delta = 30$ мм, ее толщине $h = 1, 2, \dots, 6$ мм и отсутствии выпуклости сварного шва.

Из рисунка видно, что с увеличением толщины подкладки ее размагничивающее действие возрастает. Так, при увеличении h от 1 до 6 отношение $H_x/2\sigma_n$ увеличивается по модулю больше чем в 6 раз. Расстояние от боковых граней до экстремальных значений возрастает по мере увеличения толщины подкладки.

Аналогичные графики зависимостей построены для случая толщины свариваемых пластин $s = 10$ мм. При этом размагничивающее действие под-

кладки на поверхности объекта (в отличие от случая $s = 2$ мм) с увеличением ее ширины не уменьшается, а возрастает до $2\Delta = 24$ мм, затем начинает убы-

вать (см. рис. 6). Экстремальные значения отношения $H_x/2\sigma_n$ по обе стороны боковых граней не наблюдаются.

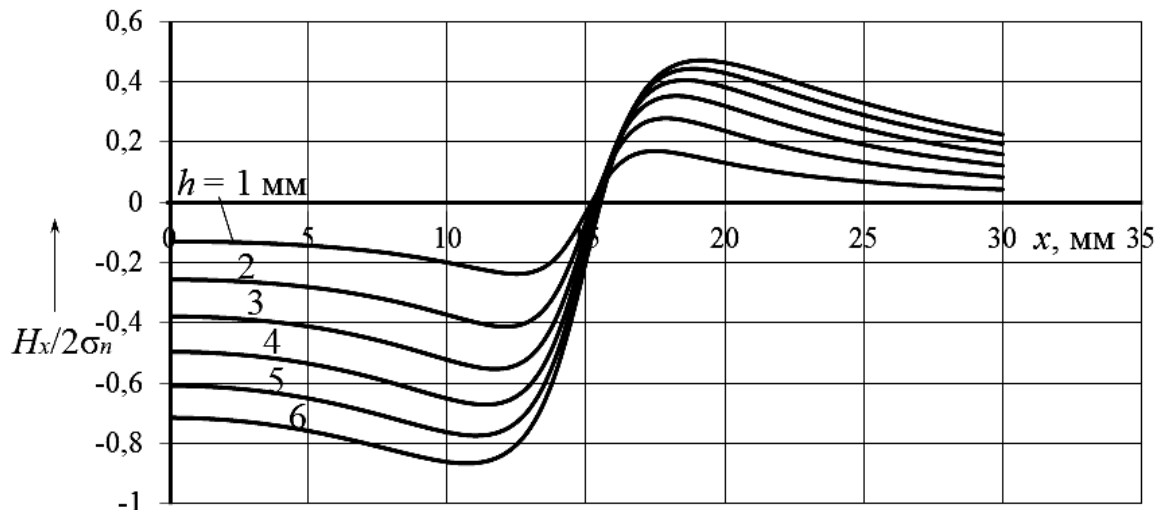


Рис. 5. Характер изменения $H_x/2\sigma_n$ на поверхности сварного соединения пластин толщиной $s = 2$ мм при отсутствии выпуклости сварного шва: ширина подкладки $2\Delta = 30$ мм; толщина подкладки $h = 1, 2, 3, \dots, 6$ мм; H_x – горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля подкладки; σ_n – поверхностная плотность «магнитных зарядов»

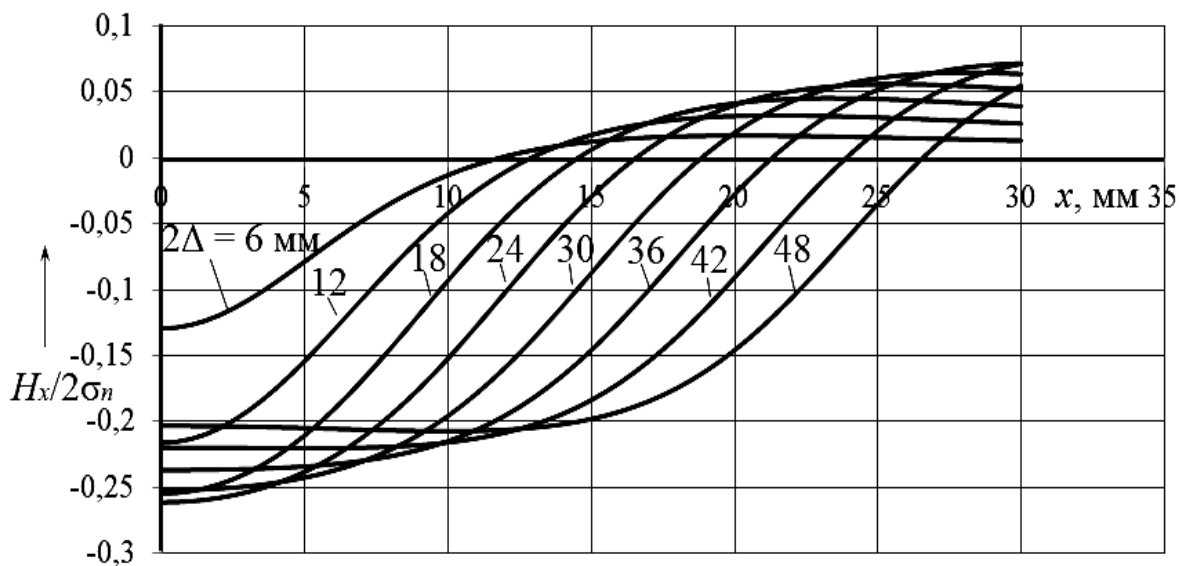


Рис. 6. Характер изменения $H_x/2\sigma_n$ на поверхности сварного соединения пластин толщиной $s = 10$ мм при отсутствии выпуклости сварного шва: ширина подкладки $2\Delta = 6, 12, \dots, 48$ мм; толщина подкладки $h = 3$ мм; H_x – горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля подкладки; σ_n – поверхностная плотность «магнитных зарядов»

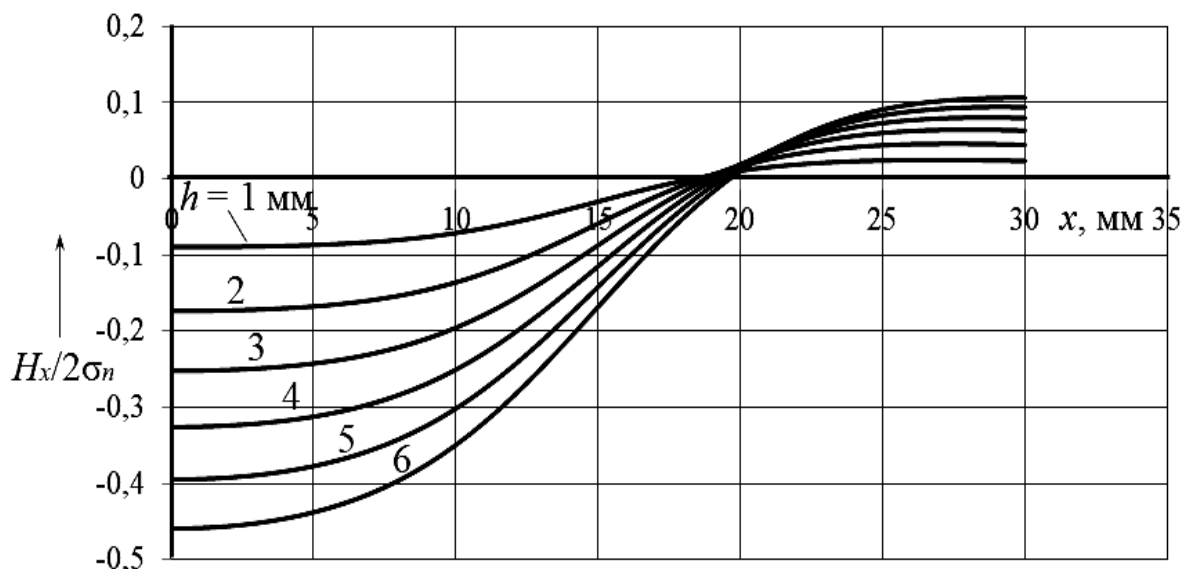


Рис. 7. Характер изменения $H_x/2\sigma_n$ на поверхности сварного соединения пластин толщиной $s = 10$ мм при отсутствии выпуклости сварного шва: ширина подкладки $2\Delta = 30$ мм; толщина подкладки $h = 2, 3, \dots, 6$ мм; H_x – горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля подкладки; σ_n – поверхностная плотность «магнитных зарядов»

Увеличение толщины подкладки приводит к росту ее размагничивающего действия, как и при $s = 2$ мм, однако оно меньше (см. рис. 7). При этом экстремальные значения $H_x/2\sigma_n$ внутри подкладки на поверхности пластины находятся в плоскости ее симметрии.

Случай 2. Имеется выпуклость шва.

Представляет интерес напряженность поля, создаваемого подкладкой на поверхности выпуклости шва. Поскольку экспериментальные исследования предполагается проводить магнитографическим методом, то проанализируем изменение тангенциальной составляющей (ориентированной по касательной к поверхности выпуклости шва) напряженности поля подкладки. Поверхность

выпуклости шва шириной b и высотой c в плоскости, перпендикулярной продольной оси шва и подкладки, описывается уравнением параболы [6]

$$y = c - \frac{4c}{b^2}x^2, \quad (3)$$

где b – ширина шва; c – высота выпуклости шва.

Расчетная схема представлена на рис. 8.

Отношение касательной напряженности поля к поверхности выпуклости шва H_τ к удвоенной поверхностной плотности «магнитных зарядов» σ_n в системе координат, представленной на рис. 8, определяется из выражения

$$\frac{H_\tau}{2\sigma_n} = \left[\operatorname{arctg} \frac{h(x-\Delta)}{(x-\Delta)^2 + (s+y)(s+y+h)} - \operatorname{arctg} \frac{h(x+\Delta)}{(x+\Delta)^2 + (s+y)(s+y+h)} \right] \cos \alpha(x). \quad (4)$$

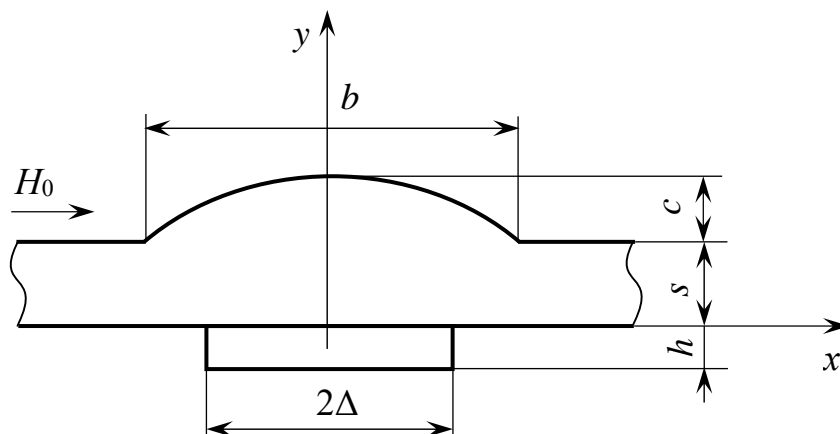


Рис. 8. Расчетная схема: s – толщина свариваемых пластин; c – высота выпуклости шва; b – ширина выпуклости шва; h – толщина подкладки; 2Δ – ширина подкладки; H_0 – напряженность внешнего поля

Косинус угла между касательной к поверхности выпуклости шва в плоскости, перпендикулярной ее продольной оси, и осью абсцисс определяется из выражения

$$\cos \alpha(x) = \pm \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{8c}{b^2}x\right)^2}}. \quad (5)$$

Верхний знак берут, когда $0 \leq x \leq b/2$, нижний – если $-b/2 \leq x \leq 0$.

На рис. 9 изображено семейство кривых, показывающих характер изменения $H_t/2\sigma_n$ на поверхности выпукло-

сти шва деталей толщиной $s = 2$ мм при изменении ширины подкладки $2\Delta = 6, 12, 18$ и 24 мм толщиной $h = 3$ мм в случае наличия выпуклости сварного шва высотой 3 мм и шириной 24 мм. Из рисунка видно, что при увеличении ширины подкладки от 6 до 12 мм ее размагничивающее действие на поверхности выпуклости шва возрастает, а при дальнейшем увеличении ее ширины – снижается. Если выпуклости шва нет, то размагничивающее действие подкладки монотонно возрастает по мере уменьшения ее ширины (см. рис. 3 и 9).

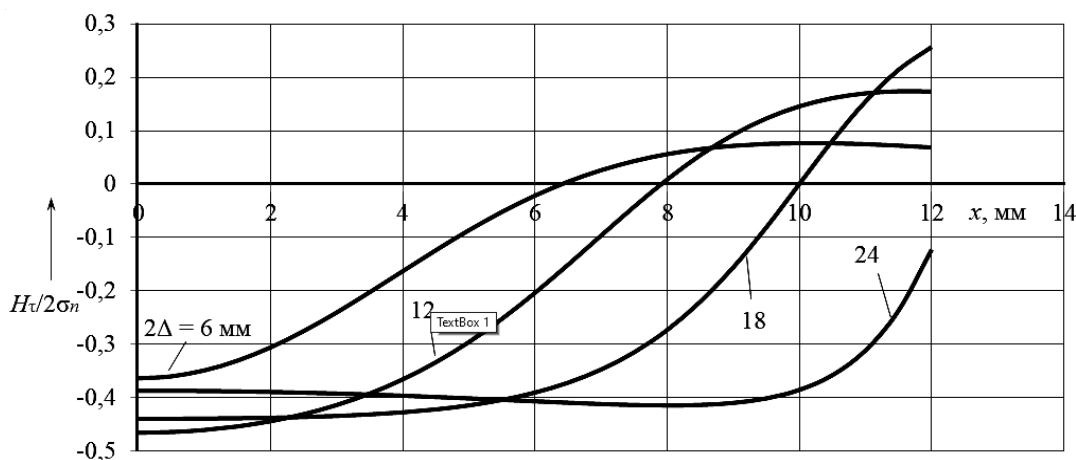


Рис. 9. Характер изменения $H_t/2\sigma_n$ на поверхности выпуклости шва: ширина шва $b = 24$ мм; высота выпуклости $c = 3$ мм; толщина свариваемых пластин $s = 2$ мм; ширина подкладки $2\Delta = 6, 12, 18, 24$ мм; толщина подкладки $h = 3$ мм; H_t – тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля подкладки; σ_n – поверхностная плотность «магнитных зарядов»

На рис. 10 представлено семейство кривых, показывающих характер изменения $H_{\tau}/2\sigma_n$ на поверхности выпуклости шва пластин толщиной $s = 2, 4, \dots, 12$ мм при ширине подкладки $2\Delta = 12$ мм и ее толщине $h = 3$ мм.

Как видно из рисунка, с увеличением толщины s свариваемых пластин размагничивающее действие подкладки на поверхности выпуклости шва уменьшается, однако вблизи подклад-

ки нет ярко выраженных минимумов, как при отсутствии выпуклости шва (см. рис. 4 и 10).

На рис. 11 изображено семейство кривых, показывающих характер изменения $H_{\tau}/2\sigma_n$ на поверхности сварного соединения с выпуклостью шва пластин толщиной s при ширине подкладки $2\Delta = 12$ мм, ее толщине $h = 1, 2, \dots, 6$ мм. Ширина шва $b = 24$ мм; высота выпуклости $c = 3$ мм.

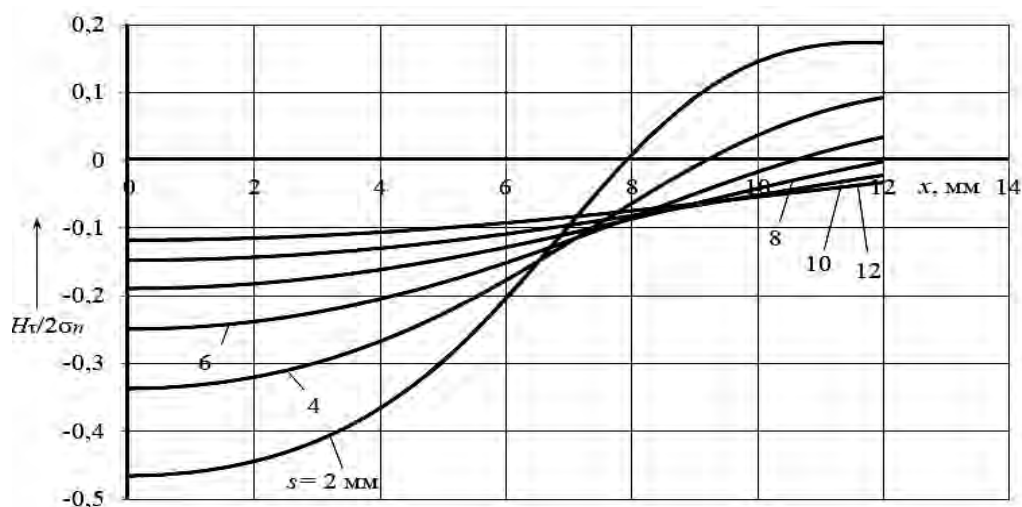


Рис. 10. Характер изменения $H_{\tau}/2\sigma_n$ на поверхности сварного соединения пластин толщиной $s = 2, 4, \dots, 12$ мм при наличии выпуклости шва: ширина шва $b = 24$ мм; высота выпуклости шва $c = 3$ мм; ширина подкладки $2\Delta = 12$ мм; толщина подкладки $h = 3$ мм; H_{τ} – тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля подкладки на поверхности выпуклости шва; σ_n – поверхностная плотность «магнитных зарядов»

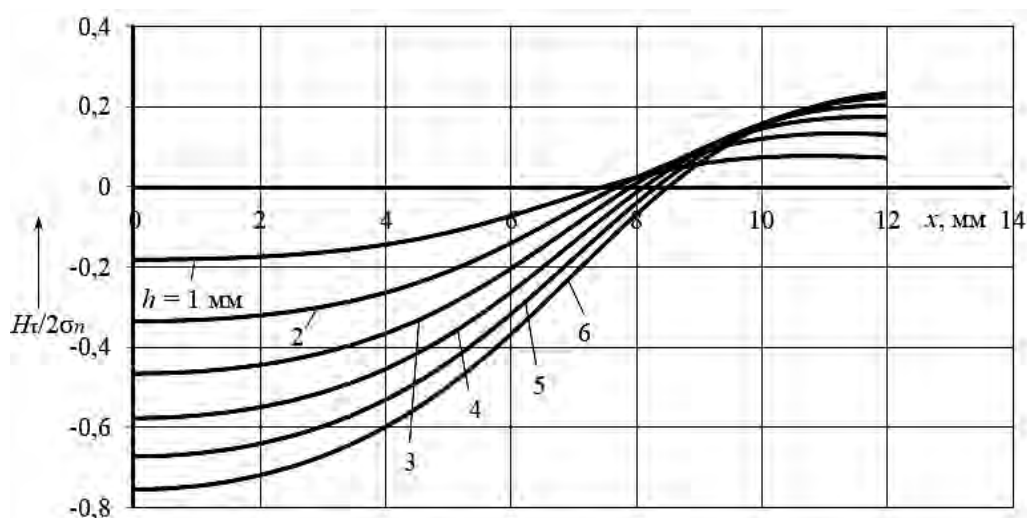


Рис. 11. Характер изменения $H_{\tau}/2\sigma_n$ на поверхности сварного соединения с выпуклостью шва: толщина свариваемых пластин $s = 2$ мм; ширина шва $b = 24$ мм; высота выпуклости $c = 3$ мм; ширина подкладки $2\Delta = 12$ мм; толщина подкладки $h = 1, 2, 3, \dots, 6$ мм

Из рисунка видно, что с увеличением толщины подкладки ее размагничивающее действие монотонно возрастает. Так, при увеличении h от 1 до 6 отношение $H_{\tau}/2\sigma_n$ увеличивается по модулю приблизительно в 4 раза. Экстремальные значения $H_{\tau}/2\sigma_n$ вблизи граней подкладки отсутствуют.

Далее представлены графики зависимостей $\frac{H_{\tau}}{2\sigma_n} = f(x)$, с учетом 2Δ ,

для случая толщины свариваемых пластин $s = 10$ мм. Из рис. 12 видно, что размагничивающее действие подкладки на поверхности выпуклости шва с увеличением ширины подкладки в диапазоне до $6 \leq 2\Delta \leq 24$ мм возрастает. Схожий результат в указанном диапазоне 2Δ имеет место и при отсутствии выпуклости шва (см. рис. 6).

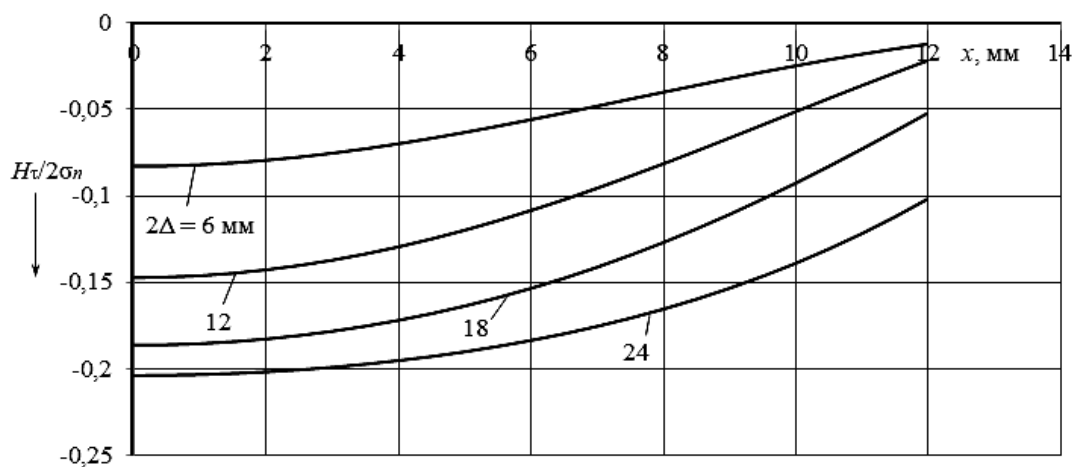


Рис. 12. Характер изменения $H_{\tau}/2\sigma_n$ на поверхности сварного соединения пластин толщиной $s = 10$ мм при отсутствии выпуклости сварного шва: ширина подкладки $2\Delta = 6, 12, \dots, 48$ мм; ширина шва $b = 24$ мм; высота выпуклости $c = 3$ мм; толщина подкладки $h = 3$ мм; H_{τ} – тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля подкладки; σ_n – поверхностная плотность «магнитных зарядов»

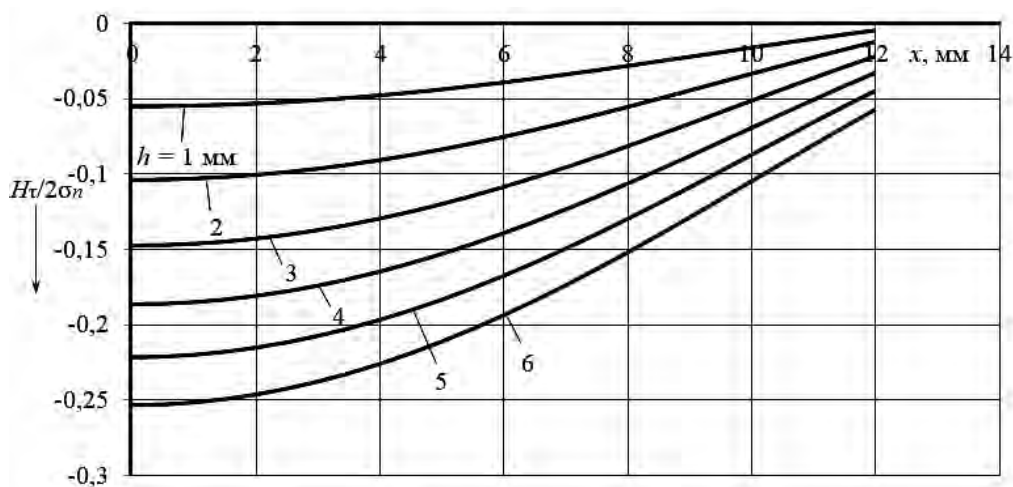


Рис. 13. Характер изменения $H_{\tau}/2\sigma_n$ на поверхности сварного соединения пластин толщиной $s = 10$ мм при наличии выпуклости сварного шва: ширина шва $b = 24$ мм; высота выпуклости $c = 3$ мм; толщина подкладки $h = 1, 2, \dots, 6$ мм; ширина подкладки $2\Delta = 12$ мм

Увеличение толщины подкладки приводит к росту ее размагничивающего действия, как и при $s = 2$ мм, однако оно меньше (см. рис. 7 и 13). При этом минимальные значения $H_x/2\sigma_n$ на поверхности сварного шва находятся в плоскости его симметрии.

Заключение

Стыковые сварные соединения, выполненные на остающейся подкладке, как правило, обеспечивают полное проплавление металла в зоне свариваемых деталей, однако не исключают появления трещин в местах перехода шва через зазор между подкладкой и основным металлом, особенно в объектах, испытывающих динамические нагрузки. Обнаружение трещин в них не гарантируют широко применяемые акустические и радиационные методы контроля. Предпочтительно в этих случаях использование магнитографического метода контроля (МГК). При намагничи-

вании в процессе МГК шва в поперечном направлении в формировании суперпозиции магнитных полей на поверхности сварного соединения участвует и поле остающейся подкладки. Это обусловлено тем, что на боковых гранях подкладки возникают магнитные полюсы, которые создают поле, направленное навстречу внешнему полю. Расчет, выполненный для случая сварного соединения без выпуклости и с выпуклостью шва, показал, что на топографию тангенциальной составляющей поля подкладки на поверхности соединения сильное влияние оказывают ширина и толщина подкладки, а также толщина свариваемых деталей. При увеличении ширины подкладки и толщины стенки объекта ее размагничивающее действие уменьшается, а при увеличении толщины подкладки – возрастает. Поэтому в таких соединениях рационально применять подкладки минимальной толщины и большой ширины.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 5264–80.** Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. – Москва: Изд-во стандартов, 1981. – 35 с.
2. **ГОСТ 14771–76.** Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. – Москва: Стандартиформ, 1977. – 39 с.
3. **ГОСТ 8713–79.** Сварка под флюсом. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. – Москва: Стандартиформ, 1977. – 35 с.
4. **ГОСТ 16037–82.** Соединения сварные стальных трубопроводов. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. – Москва: Изд-во стандартов, 1981. – 24 с.
5. **Зацепин, Н. Н.** К расчету магнитостатического поля поверхностных дефектов / Н. Н. Зацепин, В. Е. Щербинин // Дефектоскопия. – 1966. – № 5. – С. 50–59.
6. **Бельчук, Г. А.** Сварные соединения в корпусных конструкциях / Г. А. Бельчук. – Ленинград: Судостроение, 1969. – 280 с.

Статья сдана в редакцию 22 марта 2024 года

Контакты:

valeria.pantyushina@mail.ru (Пантюшина Валерия Геннадьевна);
novikovva@tut.by (Новиков Владимир Алексеевич).

V. G. PANTYUSHINA, V. A. NOVIKOV

**FORMATION OF MAGNETOSTATIC FIELD OF THE REMAINING PAD
IN THE BUTT WELD JOINT ZONE**

Abstract

The research has been done to explore how a magnetostatic field of the remaining pad in the zone of a butt weld joint is formed during weld joint magnetization in the transverse direction in the process of magnetographic testing. The calculations have taken into account the wall thickness of the welded parts and the pad dimensions. The demagnetizing effect of the pad in the presence and absence of weld convexity was compared. Recommendations for choosing pad dimensions are given.

Keywords:

magnetic control, method of magnetic charges, butt weld joint, pad parameters, weld convexity.

For citation:

Pantyushina, V. G. Formation of magnetostatic field of the remaining pad in the butt weld joint zone / V. G. Pantyushina, V. A. Novikov // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 2 (83). – P. 104–114.