

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-3-91-100

УДК 620.179.14

В. Г. ПАНТЮШИНА

В. А. НОВИКОВ, д-р техн. наук, проф.

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ МАГНИТОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ СТЫКОВОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ, ВЫПОЛНЕННОГО НА ОСТАЮЩЕЙСЯ ПОДКЛАДКЕ

Аннотация

Экспериментально исследованы особенности формирования тангенциальной составляющей напряженности магнитостатического поля в зоне стыкового сварного соединения, выполненного на остающейся подкладке, при намагничивании сварного шва в процессе магнитографического контроля. В ходе экспериментов учитывали толщину свариваемых деталей и размеры подкладки. Даны рекомендации по выбору размеров подкладок.

Ключевые слова:

магнитный контроль, стыковой шов, остающаяся подкладка, параметры подкладки, выпуклость шва.

Для цитирования:

Пантюшина, В. Г. Экспериментальное исследование формирования магнитостатического поля на поверхности стыкового сварного соединения, выполненного на остающейся подкладке / В. Г. Пантюшина, В. А. Новиков // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 3 (84). – С. 91–100.

Введение

Чтобы обеспечить полное проплавление металла в односторонних стыковых сварных соединениях, используют остающиеся подкладки, которые располагаются в области корня шва. Подкладку изготавливают из того же материала, что и свариваемые детали. Стандарты на разные виды сварки регламентируют только минимальные размеры подкладки [1–4]. Такие соединения выполняют в ресиверах, баллонах, цистернах для транспортировки нефтепродуктов и хранения сжиженного газа, в некоторых элементах резервуаров, реже – в трубах, т. к. выступа-

ющая подкладка уменьшает живое сечение трубы, что увеличивает сопротивление жидкости или газу и приводит к снижению объема прохождения продукта. В подобных объектах подход к подкладке невозможен или затруднен. Наличие концентраторов механических напряжений в зонах перехода шва через зазор между подкладкой и свариваемыми листами может привести к появлению трещин в изделиях, которые подвергаются воздействию динамических нагрузок. Такие дефекты не всегда могут быть уверенно обнаружены применяемыми методами контроля. Кроме того, в соединениях могут быть и традиционные дефекты сварки: поры, шлако-

вые включения, подрезы. Данная работа является одним из этапов исследования возможности обнаружения дефектов в таких соединениях магнитографическим методом. По этой причине экспериментальные исследования формирования магнитостатического поля на поверхности стыкового сварного соединения, выполненного на остающейся подкладке, являются актуальными.

Основная часть

Для экспериментального исследования формирования магнитостатического поля на поверхности стыкового сварного соединения, выполненного на остающейся подкладке, нужно производить измерения напряженности магнитного поля в процессе намагничивания образцов. Применяемые для измерения напряженности магнитного поля непосредственно у поверхности объекта феррозондовые, магниторезистивные преобразователи, преобразователи Холла и другие не всегда удобны: их трудно расположить соответствующим образом для измерения тангенциальной или нормальной компоненты магнитного поля на криволинейной поверхности. Кроме того, они имеют сравнительно большие размеры и позволяют выполнять измерения на достаточно большом

расстоянии от поверхности объекта. Для измерения напряженности магнитного поля в непосредственной близости от криволинейной поверхности объекта иногда применяют проградуированные ленточные локальные магнитоносители (ЛЛМ) [5].

Ленточный локальный магнитоноситель представляет собой полоску магнитной ленты шириной 1,5...2 мм. Так как толщина его магнитно-активного слоя, который нанесен на эластичную подложку, составляет от 5 до 25 мкм, то ЛЛМ позволяет приблизиться непосредственно к поверхности объекта и копировать его форму. ЛЛМ содержит небольшое количество ферромагнитного материала и поэтому слабо искажает то поле, которое измеряется. Тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля не изменяет своей величины и знака при переходе границы раздела сред, поэтому в первом приближении можно считать, что уложенный на поверхность объекта ЛЛМ позволяет измерять напряженность поля в подповерхностном слое металла.

Предварительно ЛЛМ градуировали в однородном магнитном поле бесконечно длинного соленоида, у которого отношение длины к среднему диаметру обмотки больше десяти (рис. 1).

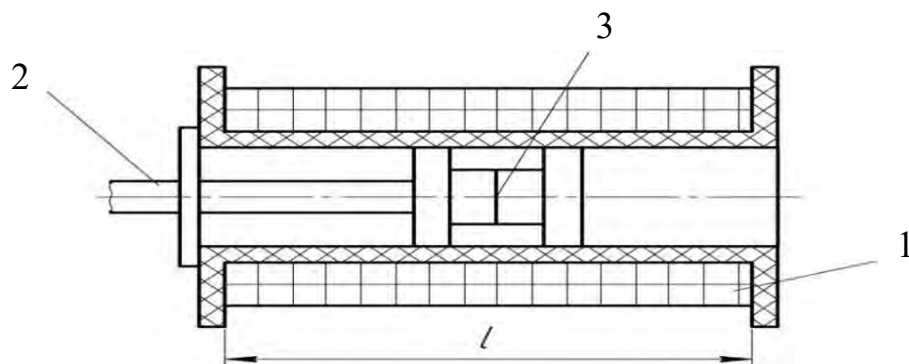


Рис. 1. Намагничивание ленточного локального магнитоносителя в соленоиде: 1 – электрическая обмотка; 2 – диэлектрическая цилиндрическая вставка; 3 – ленточный локальный магнитоноситель

С этой целью *размагниченный* ЛЛМ закрепляли на электрической цилиндрической вставке, которую с помощью штанги помещали в среднюю часть соленоида. При этом продольная ось соленоида и ось кольца, образованного ЛЛМ, совпадали. На 2...3 с включали ток в электрической обмотке. Затем ЛЛМ извлекали из соленоида и измеряли в направлении поперек ЛЛМ величину, пропорциональную напряженности его остаточного поля. В данном случае определяли размах сигнала на экране магнитографического дефектоскопа при набегании считывающей ин-

дукционной головки на край ЛЛМ. Затем ЛЛМ размагничивали, увеличивали ток в обмотке соленоида до I_2 , а после его отключения снова помещали ЛЛМ в соленоид и производили аналогичные измерения. Для измерения напряженности поля в соленоиде использовали прибор ИМП-1.

Строили график зависимости размаха сигнала, обусловленного остаточной намагниченностью ЛЛМ, от напряженности магнитного поля в соленоиде (градуировочная характеристика ЛЛМ изображена на рис. 2).

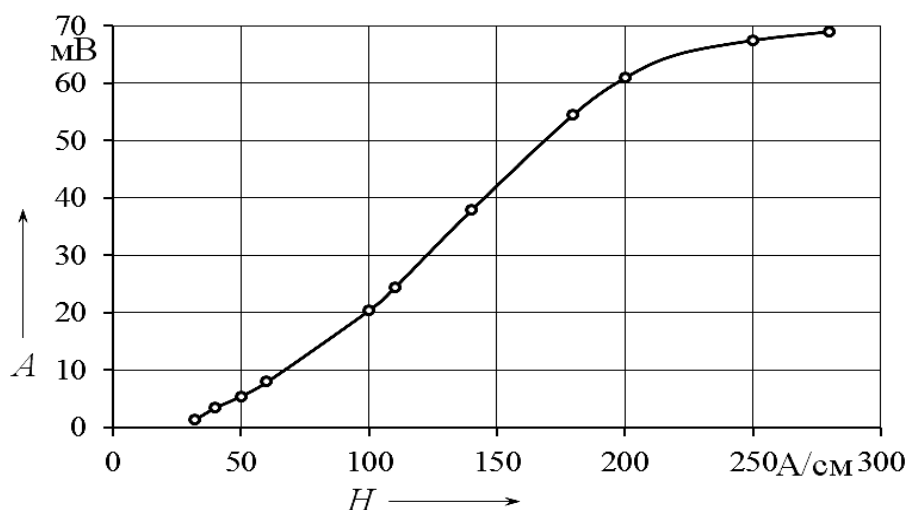


Рис. 2. Градуировочная характеристика размагниченного ленточного локального магнитносителя

Следует отметить, что размагниченный ЛЛМ не позволяет измерять поля напряженностью $H = (0,3...0,4)H_c$, где H_c – его коэрцитивная сила, т. к. в этом диапазоне полей ЛЛМ намагничивается на участке начального (обратимого) намагничивания. То есть остаточная намагниченность ЛЛМ не возникает, т. к. происходит упругое смещение границ между доменами. Для измерения слабых магнитных полей использовали *поляризованный* (предварительно намагниченный до насыщения) ЛЛМ [6].

Приборостроение

Поясним физику процесса записи магнитных полей на ЛЛМ в этом случае. Пусть в результате поляризации ЛЛМ приобрел остаточную намагниченность M_{r1} (рис. 3). Если такой ЛЛМ поместить на штанге внутрь соленоида, то при намагничивании его полем, противоположным направлением остаточной намагниченности ($-H_1$), его остаточная намагниченность уменьшается до M_{r2} . Причем чем больше $|-H_1|$, тем меньшую остаточную намагниченность будет иметь поляризованный ЛЛМ

(см. рис. 3). Следовательно, поляризованный ЛЛМ позволяет измерять напряженности слабых магнитных полей.

Методика построения градуировочной кривой в этом случае будет отличаться от вышеописанной тем, что

направление поля в соленоиде при намагничивании ЛЛМ должно быть противоположно направлению его поляризации. Градуировочная характеристика ЛЛМ для измерения слабых магнитных полей представлена на рис. 4.

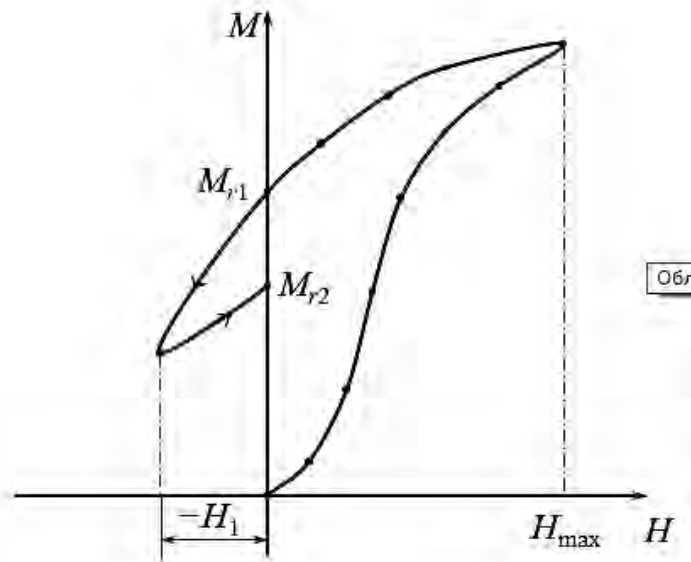


Рис. 3. К пояснению измерения напряженности магнитных полей с помощью поляризованного ЛЛМ

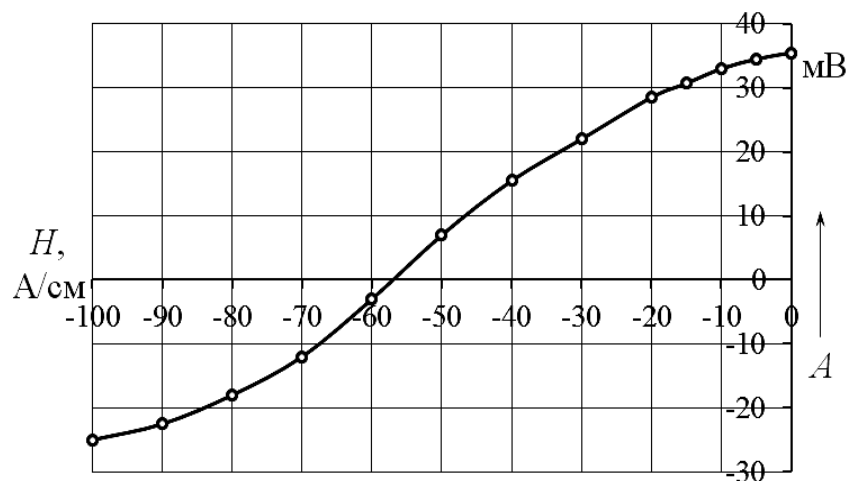


Рис. 4. Градуировочная характеристика поляризованного ленточного локального магнитоносителя

При измерениях напряженности магнитного поля размагниченный ЛЛМ укладывали на исследуемую поверхность объекта и намагничивали вместе с

объектом в направлении поперек ЛЛМ. Затем измеряли размах сигнала при считывании записи с ЛЛМ и по градуировочной кривой (см. рис. 2) определя-

ли напряженность поля. Если измеряли слабые магнитные поля, то ЛЛМ укладывали на объект так, чтобы намагничивающее поле было противоположно направлению поляризации ЛЛМ. В этом случае напряженность поля определяли по градуировочной кривой (см. рис. 4).

Сначала были изготовлены три сварных образца. С этой целью на под-

кладку укладывали две пластины из стали Ст3 размерами $90 \times 80 \times 2$ мм встык с зазором 1 мм между ними и жестко закрепляли. Продольный шов выполняли полуавтоматической сваркой в среде углекислого газа. Выпуклость шва удаляли заподлицо с основным металлом (рис. 5).

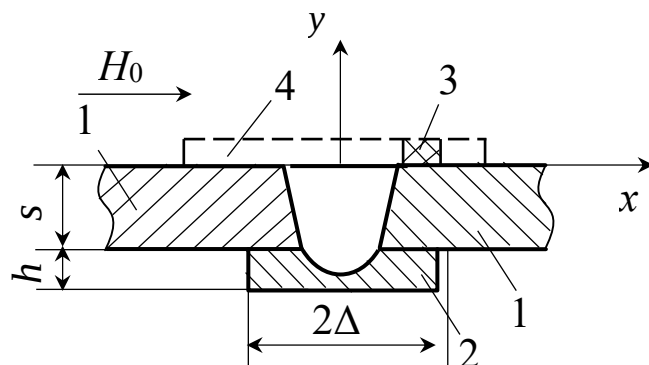


Рис. 5. Сварной образец без выпуклости шва: 1 – свариваемые пластины; 2 – остающаяся подкладка; 3 – ленточный локальный магнитоноситель (ЛЛМ); 4 – места расположения ЛЛМ

Распределение магнитного поля на поверхности образцов определяли с помощью ЛЛМ шириной 1,5 мм, изготовленных из магнитной ленты типа ИЗ701-35 по вышеописанной методике. Подкладки в образцах имели ширину 10 и 15 мм. Образцы намагничивали электромагнитом с П-образным сердечником. Число витков обмотки, выполненной медным проводом диаметром 1,42 мм, – 450. Напряженность внешнего намагничивающего поля при намагничивании образца с уложенным на его поверхность вдоль продольной оси шва ЛЛМ составляла 600 А/см.

Аналогичные эксперименты проводили на несварных образцах, изготовленных из той же стали (рис. 6). В этом случае использовали пластины размерами $180 \times 80 \times 2$ мм, а остающуюся подкладку имитировали плотно прижатой планкой шириной 10 или 15 мм с обратной стороны пластины. На поверхность пластины укладывали ЛЛМ,

затем образец намагничивали. Напряженность поля $H_{тр}$ определяли по градуировочным кривым (см. рис. 2 и 4). Оказалось, что в обоих случаях результаты экспериментов практически одинаковые. Некоторое несовпадение, видимо, можно объяснить затеканием расплавленного металла в пространство между свариваемыми пластинами и подкладкой. Поскольку несварные образцы более просты в изготовлении, то в дальнейшем их использовали при проведении экспериментов.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 7–9.

На рис. 7 показаны топографии тангенциальной составляющей суперпозиции магнитных полей $H_{тр}$ (внешнего поля и остающейся подкладки) на поверхности образца толщиной 2 мм из стали Ст3 в зависимости от ширины подкладки ($2\Delta = 4; 6; 10; 15; 19; 30$ и 46 мм). Толщина подкладок во всех экспериментах составляла 1 мм.

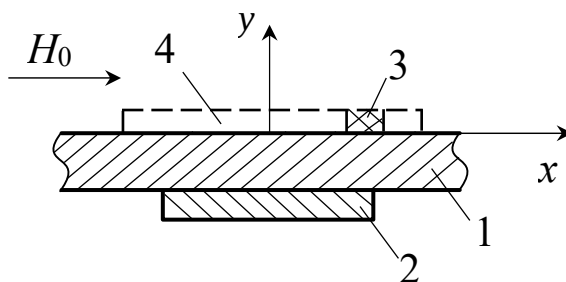


Рис. 6. Вид образцов, применяемых в экспериментах: 1 – стальная пластина; 2 – остающаяся подкладка; 3 – ленточный локальный магнитоноситель (ЛЛМ); 4 – места расположения ЛЛМ

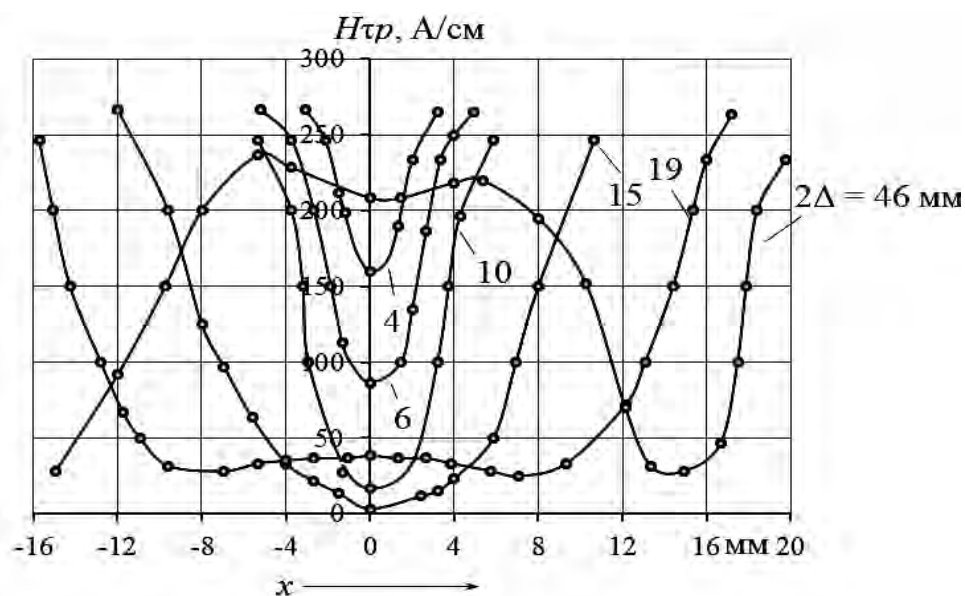


Рис. 7. Топографии тангенциальной составляющей суперпозиции магнитных полей $H_{\tau p}$ (внешнего поля и остающейся подкладки) на поверхности образца толщиной 2 мм: 2Δ – ширина подкладки

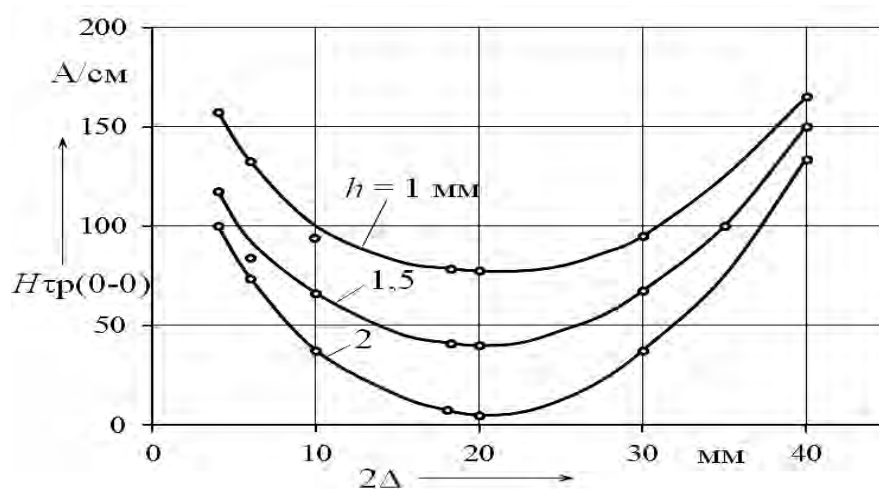


Рис. 8. Графики зависимости напряженности поля $H_{\tau p}(0-0)$ на поверхности образца толщиной 2 мм в плоскости симметрии подкладки от ширины 2Δ подкладки: h – толщина подкладки

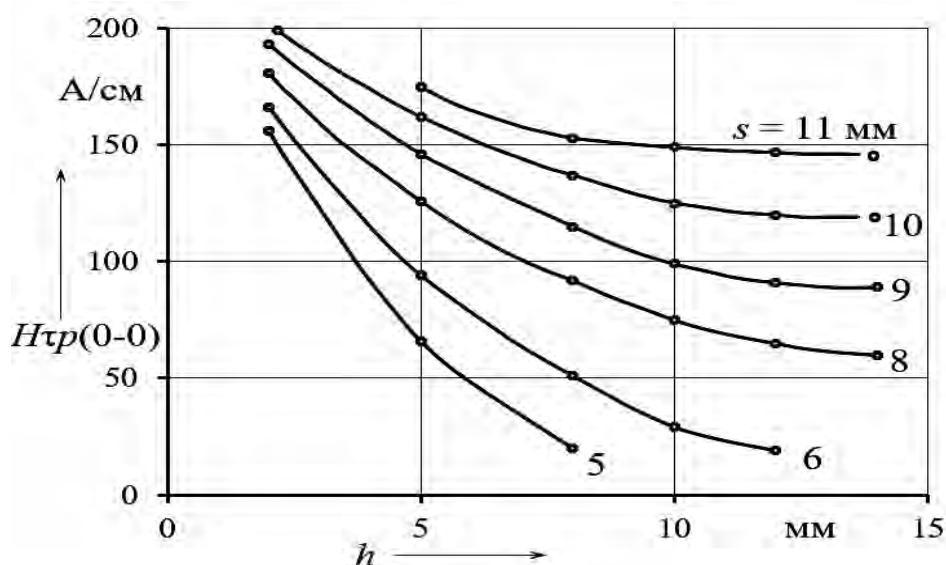


Рис. 9. Графики зависимости напряженности поля $H_{тр}(0-0)$ на поверхности образца в плоскости симметрии подкладки шириной 15 мм от ее толщины h : s – толщина пластины

Чтобы не загромождать рисунок, кривая для случая $2\Delta = 30$ мм не показана. Из рисунка видно, что с увеличением ширины подкладки от 4 до 15 мм включительно размагничивающее действие подкладки возрастает, $H_{тр}$ имеет вид U-образной кривой, ветви которой направлены вверх. Затем при увеличении 2Δ в диапазоне $19 \leq 2\Delta \leq 46$ мм в плоскости симметрии подкладки появляется максимум, величина которого возрастает. При этом кривая трансформируется из колоколообразной в двугорбую, а вблизи боковых граней подкладки на кривой возникают ярко выраженные минимумы. Последнее можно объяснить тем, что возникающие на боковых гранях подкладки магнитные полюсы оказывают наибольшее размагничивающее действие вблизи этих граней.

На рис. 8 представлены графики зависимости напряженности поля $H_{тр}(0-0)$ на поверхности образца толщиной 2 мм в плоскости симметрии подкладки от ширины подкладки ($2\Delta = 4; 6; 10; 15; 18; 20, 30$ и 40 мм) для разной ее толщины ($h = 1; 1,5; 2$ мм). Из рисунка видно, что с увеличением ширины подкладки

в диапазоне $4 \leq 2\Delta \leq 20$ мм $H_{тр}(0-0)$ сначала убывает, а затем возрастает, причем чем больше h , тем меньше напряженность результирующего поля в плоскости симметрии образца на его поверхности.

На рис. 9 показаны графики, иллюстрирующие влияние толщины подкладки ($h = 2; 5; 8; 10; 12; 14$ мм) на напряженность результирующего поля $H_{тр}(0-0)$ на поверхности образца в плоскости симметрии подкладки. Эксперименты выполнены при напряженности намагничивающего поля 600 А/см и ширине подкладки $2\Delta = 15$ мм.

Из рисунка видно, что с увеличением толщины подкладки в диапазоне $2 \leq h \leq 14$ мм напряженность поля в плоскости симметрии образца убывает, причем тем быстрее, чем меньше толщина свариваемых пластин s . При этом чем больше s , тем раньше стабилизируется напряженность результирующего поля $H_{тр}(0-0)$ на поверхности образца. Минимальная напряженность поля наблюдается при толщине свариваемых пластин $s = 2$ мм (на рисунке не показано). Увеличение толщины свариваемых

пластин приводит к резкому увеличению $H_{\text{тр}}$ (0-0), т. е. условия контроля становятся удовлетворительными.

На рис. 10 изображен сварной образец для проведения экспериментальных исследований топографии магнит-

ного поля на его поверхности. Сварной шов был выполнен автоматической сваркой под слоем флюса. Исследования проводили по вышеописанной методике. Результаты измерений представлены на рис. 11.

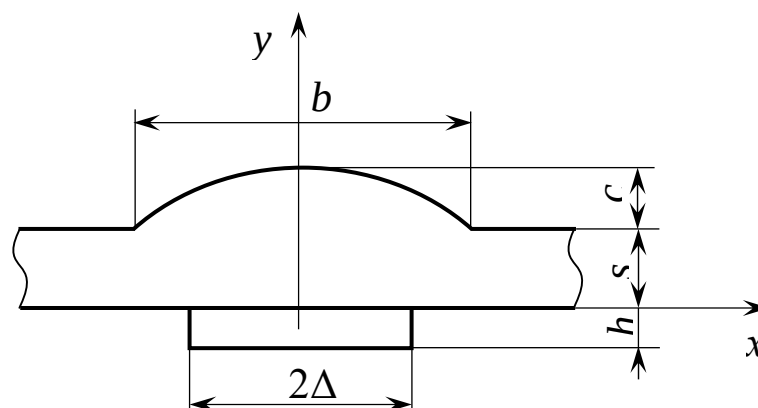


Рис. 10. Сварной образец для экспериментальных исследований: s – толщина свариваемых пластин; c – высота выпуклости шва; b – ширина выпуклости шва; h – толщина подкладки; 2Δ – ширина подкладки

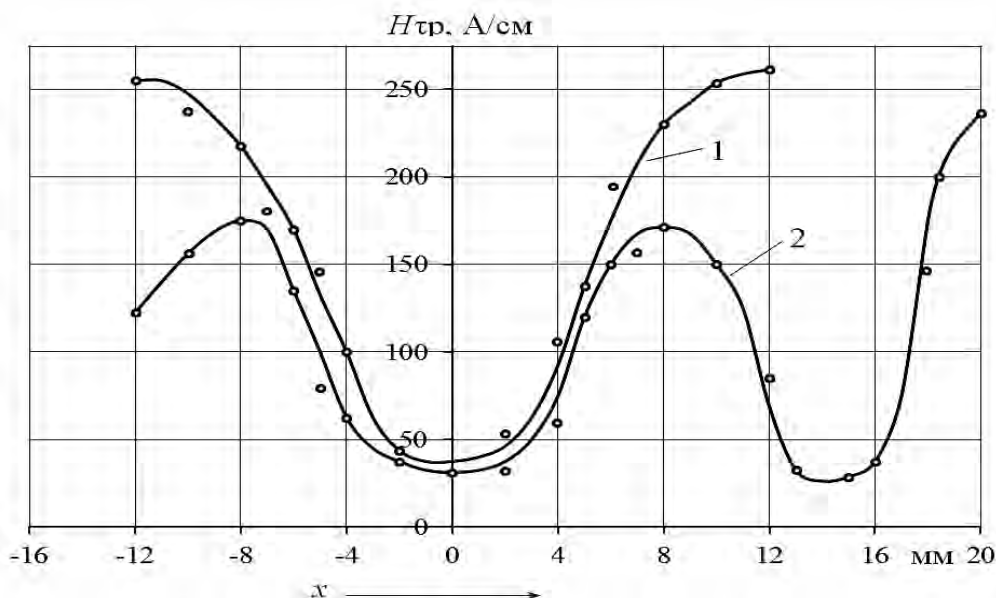


Рис. 11. Топография тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности стыкового сварного соединения: 1 – при отсутствии остающейся подкладки; 2 – при наличии подкладки

На рис. 11 изображены топографии тангенциальной составляющей напряженности результирующего поля на поверхности стыкового сварного соединения с неблагоприятными разме-

рами выпуклости шва и толщин свариваемых пластин: ширина выпуклости $b = 17,6$ мм, высота $c = 2,35$ мм (коэффициент формы выпуклости шва близок к 7). Для сравнения представлены

результаты измерения $H_{тр}$ на поверхности сварного шва пластины толщиной 2 мм из стали Ст3 при отсутствии остающейся подкладки (кривая 1), а также при ее наличии (кривая 2). Напряженность поля, создаваемого электромагнитом, при отсутствии объекта в межполюсном пространстве электромагнита, – 600 А/см. Ширина подкладки для случая, представленного на рисунке, – 46 мм, а ее толщина – 1 мм.

Из рисунка видно, что минимальная напряженность поля наблюдается в плоскости симметрии шва, причем при отсутствии подкладки она составляет около 40 А/см, а при ее наличии – незначительно меньше. Однако если толщина подкладки 1,5...2 мм, то необходимой напряженности магнитного поля на поверхности шва можно достичь только при применении в намагничивающих устройствах концентраторов магнитной индукции. Поэтому остающиеся подкладки таких размеров можно рекомендовать при выполнении соединений для уверенного обнаружения дефектов в них магнитографическим методом. Если ширина подкладки меньше 30 мм, то напряженность поля в плоскости симметрии шва меньше 10 А/см и они на рисунке не приводятся.

Следует отметить, что трещины в таких соединениях располагаются не в плоскости симметрии шва, а в месте перехода шва через зазор между остающейся подкладкой и свариваемыми пластинами, где напряженность результирующего поля значительно больше, чем в плоскости симметрии шва. Если толщина свариваемых пластин больше 2 мм, а коэффициент формы выпуклости шва больше 7, то при использовании концентраторов магнитной индукции можно достичь необходимой напряженности поля в зоне контроля, а следовательно, и чувствительности метода при толщине подкладки до 5...6 мм и минимальной ширине подкладки, регламентируемой стандартом на сварку.

Заключение

Экспериментально исследованы особенности формирования тангенциальной составляющей напряженности магнитостатического поля в зоне стыкового сварного соединения, выполненного на остающейся подкладке, при намагничивании сварного шва в поперечном направлении в процессе магнитографического контроля. В ходе экспериментов учитывали толщину стенки свариваемых деталей и размеры подкладки. Показано, что с увеличением ширины подкладки ее размагничивающее действие возрастает, а затем начинает убывать, причем колоколообразная кривая $H_{тр}(x)$ трансформируется в двугорбую, а вблизи боковых граней подкладки на кривой возникают ярко выраженные минимумы. Последнее обусловлено тем, что возникающие на боковых гранях подкладки магнитные полюсы оказывают наибольшее размагничивающее действие вблизи этих граней. С увеличением ширины подкладки напряженность поля на поверхности образца в плоскости его симметрии сначала убывает, а затем возрастает, причем чем больше толщина подкладки в диапазоне $2 \leq h \leq 14$ мм и меньше толщина свариваемых пластин s , тем меньше напряженность результирующего поля. Чем больше s , тем раньше стабилизируется напряженность результирующего поля на поверхности образца в плоскости его симметрии. Трещины в сварных соединениях, выполненных на остающейся подкладке, располагаются не в плоскости симметрии шва, а в месте перехода шва через зазор между остающейся подкладкой и свариваемыми пластинами, где напряженность результирующего поля при намагничивании соединения значительно больше, чем в плоскости симметрии шва. Даже при неблагоприятных для магнитографической дефектоскопии толщине свариваемых пластин $s = 2$ мм и размерах

выпуклости шва (коэффициент формы выпуклости шва меньше 7) при использовании концентраторов магнитной индукции в намагничивающих устройствах можно достичь необходимой напряженности поля и индукции в зоне

контроля, а следовательно, и чувствительности метода при максимальной толщине и минимальной ширине подкладки, регламентируемых стандартами на сварку.

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. **Козлов, В. С.** Техника магнитографической дефектоскопии / В. С. Козлов. – Минск: Вышэйшая школа, 1976. – 256 с.: ил.
6. Способ измерения магнитного поля на поверхности объекта: пат. BY 2154818 / В. А. Новиков, А. В. Шилов, А. В. Кушнер. – Опубл. 30.10.2009.

Статья сдана в редакцию 24 мая 2024 года

Контакты:

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

V. G. PANTYUSHINA, V. A. NOVIKOV

EXPERIMENTAL STUDY OF THE FORMATION OF MAGNETOSTATIC FIELD ON THE SURFACE OF A BUTT-WELDED JOINT MADE ON AN UNREMOVED BACKING STRIP

Abstract

The formation of the tangential component of magnetostatic field intensity in the zone of a butt-welded joint made on an unremoved backing strip has been experimentally investigated during magnetization of the weld seam in the process of magnetographic control. During the experiments, the thickness of welded parts and the dimensions of the backing strip have been taken into account. Recommendations for selecting the dimensions of the backing strip are given.

Keywords:

magnetic control, butt weld, unremoved backing strip, backing plate parameters, weld convexity.

For citation:

Pantyushina, V. G. Experimental study of the formation of magnetostatic field on the surface of a butt-welded joint made on an unremoved backing strip / V. G. Pantyushina, V. A. Novikov // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 3 (84). – P. 91–100.