

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

DOI: 10.24412/2077-8481-2025-2-90-99

УДК 620.179.14

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

В. Г. ПАНТЮШИНА

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

МАГНИТОГРАФИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С НЕБЛАГОПРИЯТНЫМИ РАЗМЕРАМИ ВЫПУКЛОСТИ ШВА

Аннотация

Согласно ГОСТ 25225–82, магнитографическому методу контроля подлежат стыковые сварные соединения, имеющие коэффициент формы выпуклости шва не менее семи. Проведены экспериментальные исследования, в которых для намагничивания сварных швов с неблагоприятными размерами выпуклости использовали концентраторы магнитной индукции. Показано, что в этом случае напряженность внешнего поля в зоне контролируемого шва возрастает в несколько раз. Это позволяет повысить чувствительность метода контроля, обеспечив обнаружение минимальных недопустимых дефектов в шве при коэффициенте формы выпуклости шва меньше пяти.

Ключевые слова:

магнитографический контроль, стыковой шов, выпуклость шва, чувствительность метода, коэффициент выпуклости шва, концентраторы магнитной индукции.

Для цитирования:

Новиков, В. А. Магнитографический контроль стыковых сварных соединений с неблагоприятными размерами выпуклости шва / В. А. Новиков, В. Г. Пантюшина // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2025. – № 2 (87). – С. 90–99.

Введение

Магнитографический метод контроля служит для выявления в стыковых сварных соединениях трубопроводов из низко- и среднелегированных, а также углеродистых ферромагнитных сталей трещин, непроваров, цепочек шлаковых включений и пор, ориентированных преимущественно вдоль шва, а также других инородных включений, резко отличающихся по своим магнитным свойствам от металла сварного соединения [1].

Контролю должны подвергаться стыковые соединения, выполненные автоматической, полуавтоматической ду-

говой или газовой сваркой, имеющие коэффициент формы выпуклости шва (отношение ширины шва к высоте выпуклости) не менее семи. Это ограничение объясняется сложностью намагничивания сварного шва до требуемого значения магнитной индукции вследствие большого размагничивающего фактора выпуклости шва. Соединение должно иметь: плавный переход от наплавленного металла шва к основному; высоту валика выпуклости шва не более 25 % стенки толщиной до 16 мм и не более 4 мм для объектов с большей толщиной стенки; высоту неровностей (чешуйчатости) на поверхности шва не более 25 % высоты валика шва, но

не свыше 1 мм [1].

Согласно [1], при контроле стыковых швов, выполненных односторонней сваркой, данный метод не гарантирует выявление непроваров, расположенных в корне шва, величиной менее 5 % толщины стенки труб, а также компактных дефектов в виде одиночных шлаковых включений и газовых пор, расположенных на значительной глубине от поверхности шва и имеющих относительную величину менее 15 %.

Следует отметить, что, согласно ТУ на ответственные объекты, непровары в корне шва величиной до 10 % считаются допустимыми.

Основная часть

Были проведены экспериментальные исследования и проанализированы их результаты при использовании разработанных способов намагничивания и магнитографического контроля. Описанные далее способы основаны на применении концентраторов магнитной индукции (КМИ). КМИ чаще всего представляют собой две пластины прямоугольного сечения толщиной от 4 до 6 мм, изготовленные из магнитомягкой стали, как правило, стали Ст3, прикрепленные к полюсам электромагнита с П-образным сердечником. Рабочие грани КМИ располагаются в зоне контролируемого сварного шва. Увеличение напряженности магнитного поля между рабочими гранями КМИ объясняется тем, что КМИ фактически позволяют приблизить полюсы НУ к контролируемой зоне, незначительно увеличивая рассеяние магнитного потока. При увеличении расстояния Δ от 1 до 50 мм между рабочими гранями КМИ сначала происходит резкое увеличение напряженности магнитного поля, которая достигает максимального значения при $\Delta = 4 \dots 6$ мм, а затем ее уменьшение по экспоненциальному закону. По этой

причине применяют концентраторы магнитной индукции с различным расстоянием между рабочими гранями, причем стремятся, чтобы расстояние Δ по возможности было меньшим.

Иногда в качестве КМИ используют искусственный дефект, поле рассеяния которого подмагничивает контролируемый сварной шов. Так, было показано, что при наличии подхода к обратной стороне объекта магнитную индукцию в шве с неблагоприятными размерами выпуклости можно существенно увеличить, используя в качестве концентратора индукции две пластины со скосом кромки, стык которых расположен с обратной стороны шва в плоскости его симметрии [2, 3]. Для отстройки от помех, обусловленных стыком пластин со скосом кромки, между контролируемым изделием и пластинами со скосом кромки укладывают пластину прямоугольного сечения соответствующей толщины (рис. 1).

Причину отстройки от помех в этом случае можно объяснить следующим образом. В [2] было показано, что при намагничивании шва в поперечном направлении, начиная с некоторой глубины залегания дефекта в плоскости симметрии шва, зависящей от размеров выпуклости шва, топография тангенциальной составляющей поля дефекта из колоколообразной трансформируется в двугорбую кривую, максимумы которой смещаются к краям выпуклости шва. Это приводит к появлению в сварном соединении областей качественно разной выявляемости дефектов (рис. 2). Если толщина промежуточной пластины такова, что искусственный дефект в виде стыка пластин со скосом кромки будет располагаться в области II, то от него на поверхности выпуклости шва в двух местах возникнут одинаковые поля рассеяния малой напряженности на равном расстоянии от плоскости симметрии шва. На экране дефектоскопа им будут соответствовать два небольших

сигнала на уровне помех. Если дефект будет находиться в области III, то делокализованные поля рассеяния дефекта будут совпадать с краями выпуклости

шва, а на экране прибора ложные сигналы от стыка пластин со скосом кромки будут отсутствовать.

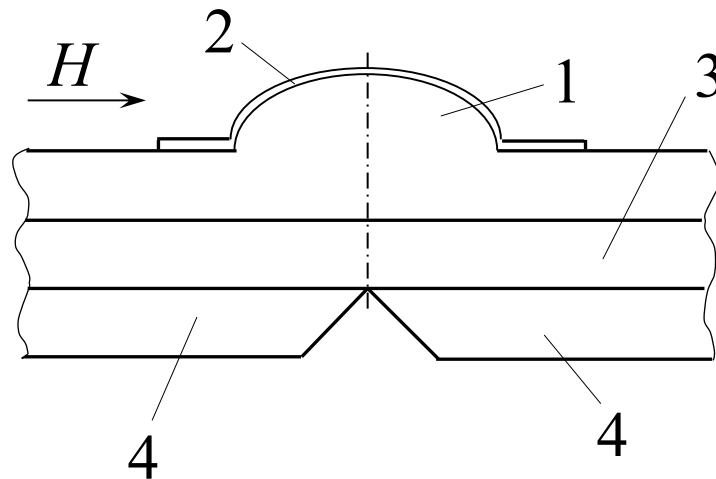


Рис. 1. Вид и расположение КМИ при осуществлении способа намагничивания [3]: 1 – контролируемый сварной шов; 2 – магнитная лента; 3 – промежуточная пластина; 4 – пластины со скосом кромок

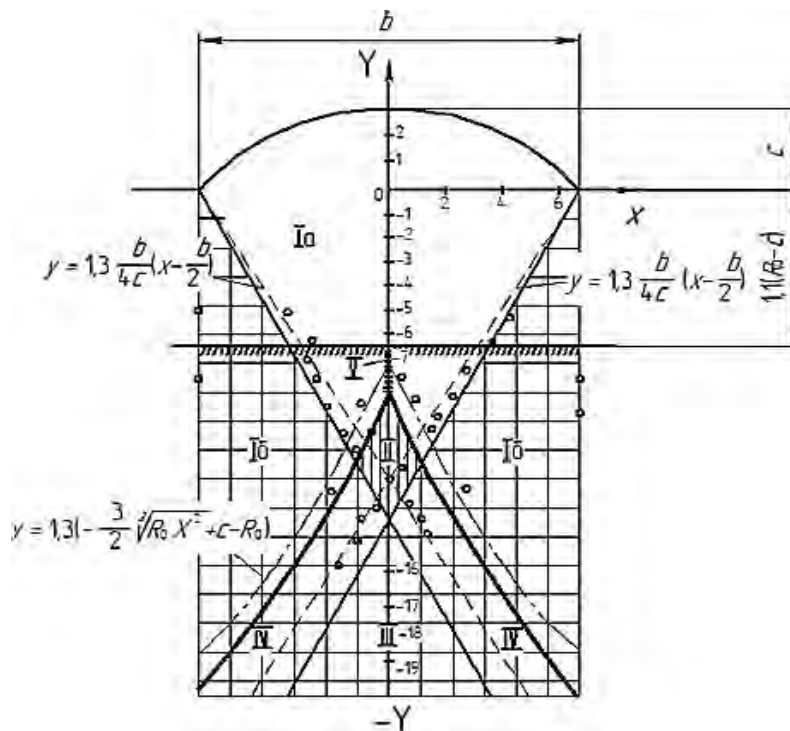


Рис. 2. Области качественно разной выявляемости дефектов в сварном соединении при намагничивании шва в поперечном направлении: если дефект находится в области Ia, то магнитное поле рассеяния, обусловленное им, возникает на поверхности выпуклости шва в одном месте; если в области II, то происходит делокализация поля рассеяния дефекта и одинаковые поля рассеяния малой напряженности возникают в двух местах, на равном расстоянии от плоскости симметрии шва; если в области III – то в двух местах, совпадающих с краями выпуклости шва; если в области IV – то на поверхности шва и у края выпуклости; если в области V, то поле рассеяния дефекта на поверхности шва не обнаруживается из-за малого градиента напряженности поля

Применяя описанный способ намагничивания, контролировали образец размерами $300 \times 300 \times 6$ мм. Односторонний сварной шов был выполнен автоматической сваркой под слоем флюса посередине пластины, выпуклость обратной стороны шва отсутствовала. Ширина выпуклости шва составляла 14,3 мм, высота – 2,6 мм, коэффициент формы выпуклости шва – 5,5. В корне шва, в плоскости его симметрии на расстоянии 60 мм от края шва и образца, была выполнена канавка глубиной 1,8 мм, длиной 65 мм и шириной 1,2 мм, имитировавшая искусственный дефект сплошности. Величина дефекта составляла 30 % толщины основного металла (или 20,9 % толщины металла сварного соединения в плоскости симметрии шва).

Подмагничивающая система содержала пластину прямоугольного сечения толщиной 4 мм, которую укладывали на обратную сторону образца, и две пластины толщиной по 6 мм со скосом кромки, стык которых располагался в плоскости симметрии шва (см. рис. 1) [3]. Традиционным способом контроля дефект только начал обнаруживаться. Размах сигнала составлял 2...3 мВ, при применении КМИ – 26 мВ.

На участке шва, где канавка, имитировавшая дефект, отсутствовала, от стыка пластин со скосом кромки на сигналограмме наблюдался ложный сигнал на уровне помех. Чтобы помехи от стыка пластин со скосом кромки полностью отсутствовали, толщина промежуточной пластины должна быть не меньше 7 мм.

Контролировали образец из стали Ст3 размерами $250 \times 150 \times 10$ мм. Двусторонний сварной шов был выполнен автоматической сваркой под слоем флюса посередине пластины. Наружная выпуклость и выпуклость обратной стороны шва имели одинаковые размеры. Ширина выпуклости шва составляла 11,4 мм, высота – 2,35 мм, коэффициент формы выпуклости шва – 4,9. В корне шва в плоскости его симметрии

на одинаковом расстоянии от наружной и внутренней поверхностей находилась узкая ниобиевая пластинка шириной 0,2 мм, высотой 0,8 мм, длиной 50 мм. Максимальная величина дефекта сплошности составляла 8 % толщины основного металла (или 5,4 % толщины металла сварного соединения в плоскости симметрии шва).

Для контроля применяли приспособление в виде стола, столешница которого имела прямоугольный проем. В его нижней части была прикреплена дощечка с уложенной на ней поролоновой подушкой. На поролоновую подушку укладывали магнитную ленту, а сверху в проем – образец. При этом магнитная лента плотно прижималась к поверхности контролируемого шва поролоновой подушкой. Намагничивание производили, как показано на схеме, изображенной на рис. 3 [4–6].

Для этого применяли намагничивающее устройство с П-образным сердечником, к полюсам которого были прикреплены концентраторы магнитной индукции в виде двух пластин прямоугольного сечения толщиной 6 мм. Расстояние между рабочими гранями КМИ составляло 6 мм, причем эти грани были параллельны полюсам электромагнита. К полюсам электромагнита были прикреплены немагнитные ролики. Устройство позволяло менять расстояние от КМИ до поверхности выпуклости шва, а также перемещать электромагнит так, что угол между продольными осями шва и КМИ составлял 10° (см. рис. 3). В экспериментах расстояние между нижней плоскостью КМИ и ближайшими точками выпуклости шва составляло 1 мм. При этом КМИ позволяли создавать поле максимальной напряженности, которое в процессе перемещения НУ сканировало всю поверхность выпуклости шва.

Параметры электромагнита намагничивающего устройства: сечение полюса электромагнита составляет 120×25 мм;

межполюсное расстояние – 130 мм; число витков провода электрической обмотки – 450; диаметр провода – 1,42 мм.

С использованием КМИ дефект

был уверенно обнаружен, размах сигнала, обусловленного дефектом, составил 28 мВ. Традиционным способом обнаружить дефект не удалось.

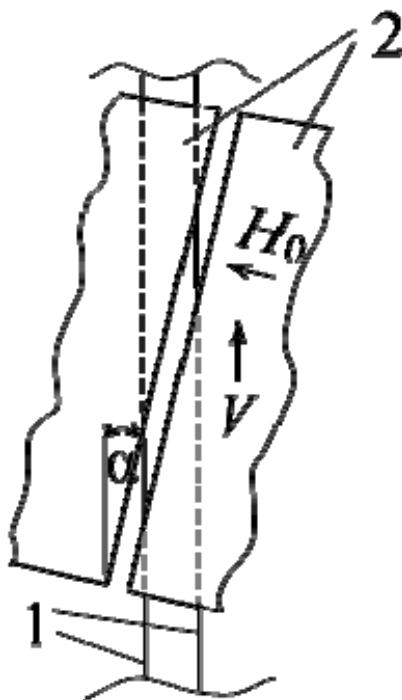


Рис. 3. Расположение КМИ при осуществлении способа намагничивания [4]: 1 – контролируемый сварной шов; 2 – пластины прямоугольного сечения

Следует отметить, что если магнитная лента находилась на наружной поверхности шва, то обнаружить наличие дефекта в шве было практически невозможно из-за большого фона помех, обусловленных даже незначительными неровностями на выпуклости шва.

Контролировали сварной шов образца размерами $300 \times 30 \times 6$ мм. Односторонний сварной шов был выполнен посередине пластины автоматической сваркой под слоем флюса, обратная выпуклость шва отсутствовала. Ширина выпуклости шва составляла 12,1 мм, высота – 2,25 мм, коэффициент формы выпуклости шва – 5,4. В корне шва в плоскости его симметрии посередине образца выполнена клинообразная канавка длиной 115 мм, шириной 0,8 мм, глубина которой менялась от 0 до 2,4 мм.

Максимальная величина дефекта сплошности составляла 2,4 мм (или 40 % толщины основного металла, или 29,1 % толщины металла сварного соединения в плоскости симметрии шва).

В процессе экспериментов определяли, какой минимальной глубины дефект начинал обнаруживаться как при традиционном способе контроля, так и при применении КМИ. Было установлено, что при традиционном способе контроля минимальная глубина обнаруживаемого дефекта составила 29 % толщины основного металла. Напряженность поля, создаваемого электромагнитом в межполюсном пространстве при отсутствии объекта контроля, составляла 460 А/см.

Сварной шов контролировали при реализации способа МГК [7]. Схема

намагничивания представлена на рис. 4.

Расстояние между КМИ толщиной 6 мм составляло 35 мм. С использованием КМИ был обнаружен дефект величиной 6,8 % толщины. Напряженность поля при отсутствии объекта в плоскости симметрии рабочих граней

КМИ составляла 1440 А/см. При такой схеме намагничивания грани КМИ должны находиться на некотором расстоянии от краев шва, исключающем появление помех, обусловленных самими рабочими гранями КМИ.

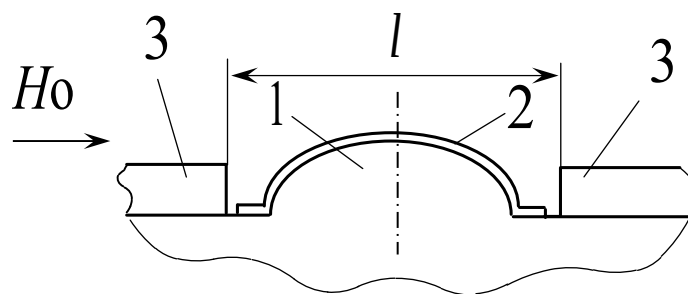


Рис. 4. Вид и расположение КМИ при осуществлении способа магнитографического контроля [7]: 1 – контролируемый сварной шов; 2 – магнитная лента; 3 – концентраторы магнитной индукции

Поле более высокой напряженности можно также создать, если КМИ расположить над поверхностью шва, причем рабочие грани на одинаковом расстоянии от плоскости симметрии шва и на расстоянии 8 мм друг от друга (рис. 5). При контроле судить о наличии дефектов в плоскости симметрии шва и его окрестностях, а в остальном шве – при традиционном способе контроля. Недостаток – необходимость проведе-

ния контроля дважды [8].

Более рационально сварной шов вместе с прижатой к его поверхности магнитной лентой намагничивать, когда подмагничивающие пластины располагаются на высоте $c + \Delta$ от поверхности объекта, где $\Delta \leq 4$ мм, а расстояние между гранями КМИ равно ширине шва (рис. 6). В этом случае сварной шов будет намагничен сильнее и более равномерно в поперечном направлении [9].

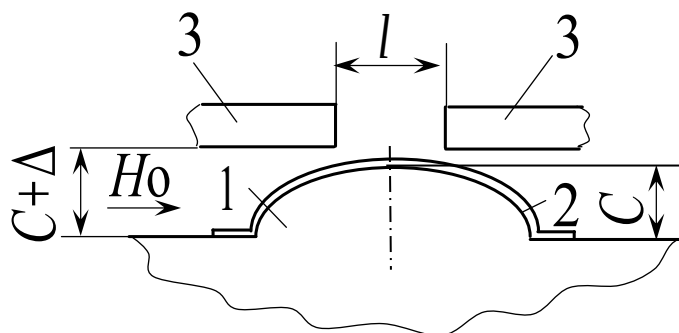


Рис. 5. Вид и расположение КМИ при осуществлении способа магнитографического контроля [8]: 1 – контролируемый сварной шов; 2 – магнитная лента; 3 – концентраторы магнитной индукции

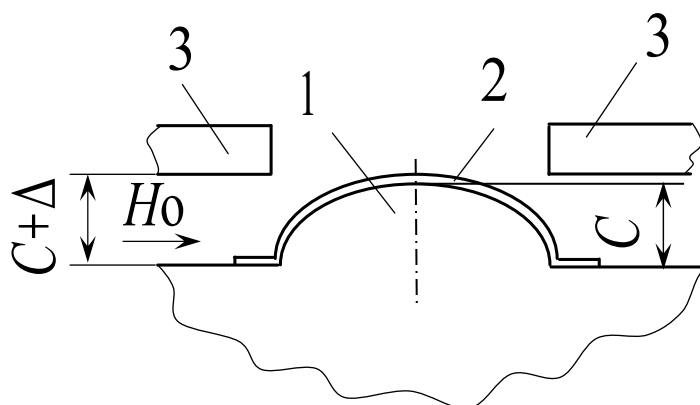


Рис. 6. Вид и расположение КМИ при осуществлении способа магнитографического контроля [9]: 1 – контролируемый сварной шов; 2 – магнитная лента; 3 – концентраторы магнитной индукции

Контролировали сварной шов образца размерами $300 \times 300 \times 6$ мм. Односторонний сварной шов был выполнен посередине пластины автоматической сваркой под слоем флюса, обратная выпуклость шва отсутствовала. Ширина выпуклости шва составляла 15,5 мм, высота – 2,65 мм, коэффициент формы выпуклости шва – 5,8. В корне шва в плоскости его симметрии посередине образца выполнена клинообразная канавка длиной 128 мм, шириной 0,8 мм, глубина которой менялась от 0 до 2,8 мм. Максимальная величина дефекта сплошности составляла 46,6 % толщины основного металла (или 32,4 % толщины металла сварного соединения в плоскости симметрии шва).

Традиционным способом МГК начал обнаруживаться дефект величиной 26 % от толщины основного металла.

Вышеописанный сварной шов контролировали с использованием КМИ. Схема намагничивания представлена на рис. 4 [7]. Расстояние между рабочими гранями КМИ составляло 35 мм. С использованием КМИ обнаружен дефект величиной 6,6 %.

Контролировали образец размерами $200 \times 100 \times 3$ мм. Односторонний сварной шов был выполнен посередине пластины автоматической сваркой под флюсом на охлаждаемой водой медной подкладке параллельно стороне 100 мм.

Ширина выпуклости шва составляла 11,1 мм, высота – 2,25 мм, коэффициент формы выпуклости шва – 4,9. В корне шва была профрезерована канавка шириной 0,8 мм, глубиной 1,0 мм. Величина дефекта сплошности составляла 33 % толщины основного металла (или 19 % толщины металла сварного соединения в плоскости симметрии шва).

Традиционным методом контроля дефект не обнаружился. При применении КМИ (см. рис. 4) [7] размах сигнала составил 22 мВ. Расстояние между рабочими гранями КМИ составляло 35 мм.

Контролю подлежал образец размерами $200 \times 100 \times 3$ мм, односторонний сварной шов которого был выполнен посередине образца автоматической сваркой под флюсом на охлаждаемой водой медной подкладке параллельно стороне 100 мм. Ширина выпуклости шва составляла 13,2 мм, высота – 2,65 мм, коэффициент формы выпуклости шва – 5,0. В корне шва была профрезерована канавка шириной 0,8 мм, глубиной 0,5 мм. Величина дефекта сплошности составляла 16,7 % толщины основного металла (или 8,8 % толщины металла сварного соединения в плоскости симметрии шва).

Традиционным методом контроля дефект не обнаружился. При применении КМИ (см. рис. 4) [7] размах сигнала составил 28 мВ. Расстояние между рабо-

чими гранями КМИ составляло 35 мм.

Показано, что при применении концентраторов магнитной индукции различного вида можно в несколько раз увеличить напряженность внешнего поля в зоне выпуклости шва и, как следствие, повысить чувствительность метода контроля, обеспечив удовлетворительные результаты даже при коэффициенте формы усиления шва меньше пяти.

Все образцы для исследований были изготовлены из стали Ст3.

Концентраторы магнитной индукции применяют и тогда, когда об отсутствии непровара в корне одностороннего шва судят по присутствию двух одинаковых сигналов, кососимметрично расположенных на сигналограмме, обусловленных краями обратной выпуклости шва при полном проплавлении свариваемых деталей (см. рис. 2). Если при односторонней сварке происходит полное проплавление соединяемых деталей, то образуется обратный валик шва, что говорит о качественном соединении, т. е. об отсутствии непровара [10].

Контролировали образец размерами $200 \times 100 \times 6$ мм с односторонним сварным швом, выполненным с полным проплавлением свариваемых пластин: ширина наружной выпуклости шва $b_1 = 10,9$ мм, высота $c_1 = 2,45$ мм; коэф-

фициент формы выпуклости шва $\psi = 4,4$; ширина обратной выпуклости шва $b_2 = 7,8$ мм, высота $c_2 = 2,2$ мм.

Магнитную ленту укладывали на поверхность наружной выпуклости шва, образец контролировали традиционным способом. Сигналов, обусловленных краями обратной выпуклости шва, на сигналограмме не было. Тот же сварной шов контролировали при использовании для намагничивания КМИ толщиной 6 мм, уложенных на поверхность образца по разные стороны шва. Расстояние между рабочими гранями КМИ составляло 35 мм. На сигналограмме наблюдали два одинаковых кососимметрично расположенных сигнала 1 (рис. 7), что косвенно говорит об отсутствии непровара в сварном соединении. При этом сигнал размахом A можно ошибочно принять за сигнал, обусловленный дефектом. То, что это не так, можно понять, сравнивая сигналограммы (см. рис. 7 и 8, б), а именно в случае сигнала, обусловленного дефектом, его ветви являются продолжением сигналов, обусловленных валиком шва. При наличии обратной выпуклости шва отрезок прямой на сигналограмме соединяет кососимметрично расположенные сигналы небольшого размаха (см. рис. 7).

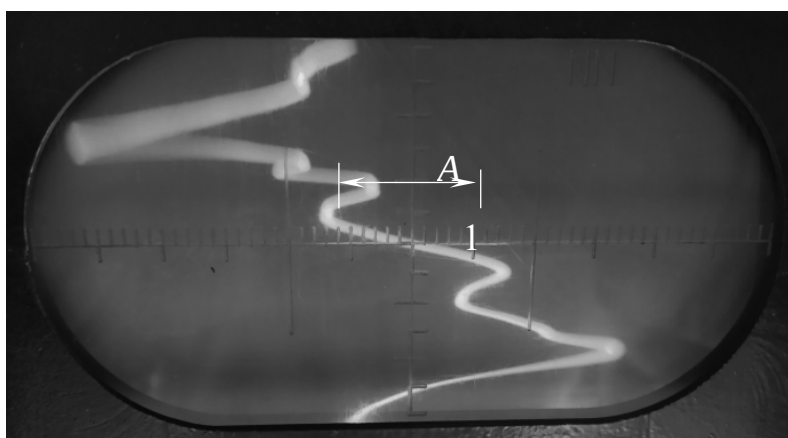


Рис. 7. Вид сигналограммы при магнитографическом контроле сварного соединения с выпуклостью обратной стороны шва (с полным проплавлением стыка пластин)

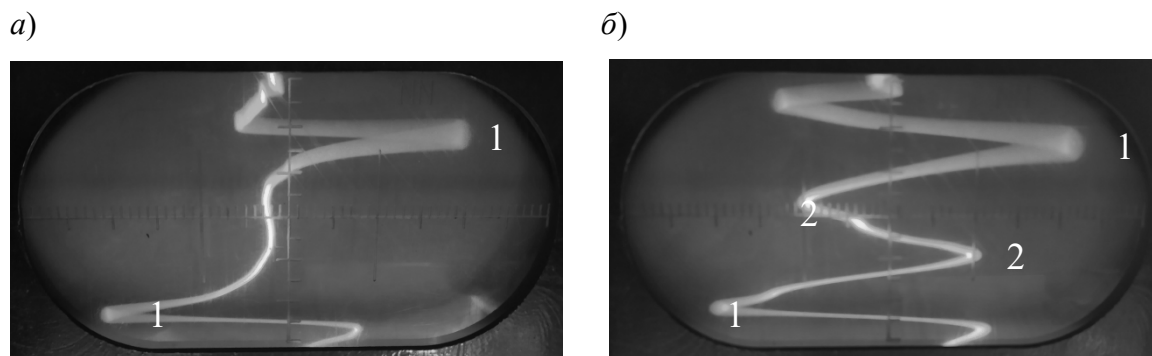


Рис. 8. Вид сигналограммы на экране дефектоскопа при отсутствии выпуклости обратной стороны шва: а – в шве нет дефекта; б – в шве есть дефект; 1 – помехи, обусловленные выпуклостью шва; 2–2 – двуполярный синусоидальный сигнал, обусловленный дефектом

Заключение

Согласно ГОСТ 25225–82, магнитографическому методу контроля подлежат стыковые сварные соединения, имеющие коэффициент формы выпуклости шва (отношение ширины шва к высоте выпуклости) не менее семи. Это объясняется большим размагничивающим действием выпуклости таких швов, что не позволяет достичь необходимого значения магнитной индукции в контролируемых сечениях для уверенного обнаружения недопустимых дефектов сплошности в них.

Проведены исследования с использованием разработанных способов намагничивания и магнитографического контроля, которые показали возможность уверенного обнаружения недопустимых дефектов в сварных соединениях с коэффициентом формы выпуклости шва менее семи. Эксперименты проводили на образцах с двусторонними и односторонними сварными швами, с выпуклостью обратной стороны шва и без нее, с подходом и без подхода к обратной стороне образца. Для создания полей высокой напряженности использовали концентраторы магнитной индукции (КМИ) в виде пластин прямоугольного сечения, изготовленных из

магнитомягкой стали, прикрепленных к полюсам электромагнита, рабочие грани которых располагались в зоне контролируемого шва, либо в виде двух пластин со скосом кромки. Применяли КМИ: расположенные на поверхности образца; на некотором расстоянии от поверхности; с разным расстоянием между рабочими гранями; при сканировании поверхности шва перемещаемыми КМИ; КМИ в виде специально созданного искусственного дефекта, поле рассеяния которого подмагничивало контролируемый сварной шов, с последующей отстройкой от ложных сигналов.

Это позволило в несколько раз увеличить напряженность внешнего поля в зоне шва с неблагоприятными размерами выпуклости, повысить чувствительность метода контроля, обеспечив обнаружение минимальных недопустимых дефектов даже при коэффициенте формы выпуклости шва меньше пяти. Показана также возможность обнаружения наличия полного проплавления стыка пластин, а следовательно, отсутствия непровара в односторонних сварных соединениях косвенным методом по появлению сигналов, обусловленных выпуклостью обратной стороны шва, на сигналограмме.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Контроль неразрушающий. Швы сварных соединений трубопроводов. Магнитографический метод: ГОСТ 25225–82. – М.: Гос. ком. СССР по стандартам, 1982. – 15 с.
2. **Новиков, В. А.** Исследование магнитографического метода контроля стыковых сварных соединений с целью повышения его разрешающей способности: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.11 / Новиков Владимир Алексеевич. – Свердловск, 1985. – 208 л.
3. Авторское свидетельство SU 565245. Способ намагничивания при контроле односторонних сварных соединений: опубл. 15.07.1977 / Шарова А. М., Новиков В. А.
4. Авторское свидетельство SU 1672345. Способ магнитографического контроля: опубл. 23.08.1991 / Новиков В. А.
5. Авторское свидетельство SU 1546898. Способ намагничивания при контроле ферромагнитных изделий: опубл. 28.02.1990 / Новиков В. А.
6. Авторское свидетельство SU 1793359. Способ магнитографического контроля стыковых сварных швов: опубл. 07.02.1993 / Новиков В. А., Романов В. А.
7. Авторское свидетельство SU 1196746. Способ магнитографического контроля сварных соединений: опубл. 07.12.1985 / Шарова А. М., Новиков В. А., Магилинский А. П.
8. Авторское свидетельство SU 1797033. Способ магнитографического контроля стыковых сварных швов: опубл. 23.02.1993 / Новиков В. А., Романов В. А.
9. Авторское свидетельство SU 1422125. Способ магнитографического контроля: опубл. 07.09.1988 / Новиков В. А.
10. **Кушнер, А. В.** Обнаружение дефектов в стыковых сварных соединениях косвенным методом / А. В. Кушнер, А. В. Шилов, В. А. Новиков // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: сб. тр. 8 Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 129–133.

Статья сдана в редакцию 25 апреля 2025 года

Контакты:

novikovva@tut.by (Новиков Владимир Алексеевич);

valeria.pantyushina@mail.ru (Пантюшина Валерия Геннадьевна).

V. A. NOVIKOV, V. G. PANTYUSHINA

MAGNETOGRAPHIC TESTING OF BUTT WELDED JOINTS WITH UNFAVORABLE WELD CONVEXITY DIMENSIONS

Abstract

According to GOST 2525–82, the magnetographic method of control is applied to butt welded joints with a weld convexity shape factor of at least seven. Experimental studies were conducted in which magnetic induction concentrators were used to magnetize welded joints with unfavorable convexity dimensions. It is shown that in this case the external field strength in the controlled weld zone increases several times. This allows increasing the sensitivity of the control method, ensuring the detection of minimal unacceptable defects in the weld with a weld convexity shape factor of less than five.

Keywords:

magnetographic testing, butt weld, weld convexity, method sensitivity, weld convexity coefficient, magnetic induction concentrators.

For citation:

Novikov, V. A. Magnetographic testing of butt welded joints with unfavorable weld convexity dimensions / V. A. Novikov, V. G. Pantyushina // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2025. – № 2 (87). – P. 90–99.