

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

DOI: 10.24412/2077-8481-2026-2-79-88

УДК 620.179.14

В. А. НОВИКОВ, д-р техн. наук, проф.

В. Г. ПАНТЮШИНА

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ОСНОВНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ УНИВЕРСАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ МАГНИТОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ

Аннотация

Проанализированы основные недостатки существующих методик магнитографического контроля различных объектов. Рассмотрен ряд высокоэффективных способов намагничивания, магнитного и магнитографического контроля. Показано, что они могут быть использованы для усовершенствования методики контроля с учетом конструктивно-технологических особенностей изделий, вида и типа обнаруживаемых дефектов, особых условий эксплуатации объектов.

Ключевые слова:

неразрушающий контроль, магнитографический метод, дефекты сплошности, методика контроля.

Для цитирования:

Новиков, В. А. Основные предпосылки для разработки универсальной методики магнитографического контроля ферромагнитных объектов / В. А. Новиков, В. Г. Пантюшина // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2026. – № 2 (91). – С. 79–88.

Введение

Согласно ГОСТ 25225–82, магнитографическому контролю должны подвергаться стыковые соединения, имеющие коэффициент формы выпуклости шва (отношение ширины шва к высоте выпуклости) не менее 7. Это ограничение обусловлено сложностью намагничивания сварного шва до требуемого значения магнитной индукции вследствие большого размагничивающего фактора выпуклости шва. В сварных соединениях изделий из низкоуглеродистых и некоторых низколегированных сталей непровары, подрезы, цепочки пор, шлаковых включений ориентированы вдоль продольной оси шва. Поэтому при магнитографическом контро-

ле рекомендовали такие объекты намагничивать поперек продольной оси шва. Считалось, что выявляемость дефектов в этом случае будет наилучшей. По данной причине дефектоскопы комплектовались устройствами, которые намагничивают шов в поперечном направлении (дисковые электромагниты, подвижные намагничивающие устройства, намагничивающие клещи, магнитные вилки, магнитные пояса и др.) [1].

Основная часть

В связи с появлением высокоэффективных способов намагничивания, магнитного и магнитографического контроля возникла необходимость в разработке универсальной методики

контроля, позволяющей значительно повысить возможности метода контроля. При ее разработке использованы как созданные способы и средства дефектоскопии, так и установленные новые закономерности формирования магнитостатических полей в контролируемой зоне при намагничивании изделия.

Рассмотрим эти случаи подробнее, прежде чем опишем положения универсальной методики контроля.

1. Контроль объектов на наличие поверхностных дефектов микроскопического раскрытия.

При намагничивании ферромагнитного объекта поперек плоскости наружного дефекта микроскопической ширины над дефектом возникает узкий локальный магнитный поток как вследствие шунтирования части потока металлом объекта и самим дефектом, так и из-за близости стенок несплошности. Если на поверхности объекта контроля находится магнитная лента, то в ней над такой несплошностью возникает слабое приращение остаточной намагниченности. В этом случае при считывании записи с магнитной ленты на сигналограмме или регистрограмме не появляется сигнал, соответствующий дефекту.

Чтобы обнаружить такие дефекты, Ю. Б. Фещенко в [2] предложил при намагничивании объекта перпендикулярно плоскости дефекта перемещать магнитную ленту по поверхности объекта вдоль направления намагничивания. При этом на ленте образуется широкий след приращения остаточной намагниченности, обусловленный дефектом. Размах сигнала при считывании записи будет максимальным, если ленту переместить на расстояние от 2,8 до 3,2 мм [3]. В [4, 5] описаны способы определения координат расположения как узких протяженных, так и компактных дефектов разной величины, находящихся в объекте на различной глубине, в этом случае.

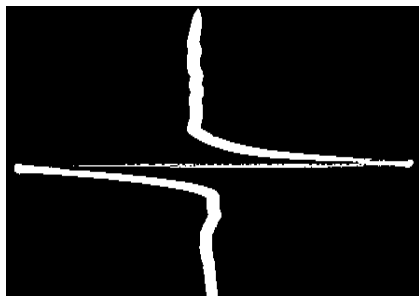
2. Контроль объектов на наличие поверхностных дефектов в особых

условиях эксплуатации объекта (коррозионная среда, длительное время эксплуатации, труднодоступные места, большая высота, под водой, взрывоопасные помещения и т. д.).

Для обнаружения дефектов, находящихся в объекте на глубине до 3 мм, предлагается объект намагничивать через магнитную ленту, уложенную на его поверхность, полюсом электромагнита или постоянным магнитом, перемещаемым над лентой. Если ширина полюса (или постоянного магнита) больше ширины ленты, а магнит перемещают вдоль ленты, то при считывании записи с ленты будут отсутствовать помехи, обусловленные неоднородностью внешнего поля. Чувствительность метода будет определяться величиной магнитной индукции в зоне несплошности, которая обусловлена тем, что контроль производится в приложенном поле, а напряженность поля максимальна в непосредственной близости от полюса [6].

При неразрушающем контроле объектов, длительное время бывших в эксплуатации, особенно в агрессивной среде, и подвергавшихся коррозии, на экране дефектоскопа в процессе воспроизведения записи с магнитной ленты наблюдается большое количество помех, вызванных поверхностными неровностями. Выделить на их фоне полезный сигнал, обусловленный дефектом, бывает затруднительно. Вышеописанный способ позволяет произвести селекцию сигналов, которая дает возможность отличить сигналы от недопустимых, опасных дефектов (трещин, узких несплавлений) от сигналов, обусловленных поверхностными неровностями, углублениями, грубой шероховатостью поверхности. При использовании для записи магнитного рельефа объекта высококоэрцитивной ленты в случае трещины на экране дефектоскопа будет наблюдаться строго дипольный импульс, а во втором случае – незначительно искаженный однополярный (рис. 1, а, б).

а)



б)



Рис. 1. Вид сигналограммы при магнитографическом контроле с намагничиванием объекта перемещаемым постоянным магнитом через уложенную на его поверхность магнитную ленту: а – при обнаружении дефекта в виде трещины или узкого несплавления; б – при обнаружении широкого поверхностного дефекта (риски, углубления от поверхностных неровностей)

Необходимость применения высококоэрцитивной магнитной ленты объясняется тем, что она имеет протяженный линейный участок магнитной характеристики, при записи на котором не происходит искажения магнитного поля рассеяния дефекта.

Объясним вид сигнала, обусловленного дефектом, в этом случае [3]. Со стороны перемещаемого над магнитной лентой, уложенной на объект, магнита как на ленту, так и на объект действуют тангенциальная и нормальная составляющие магнитного поля. В случае трещины распределение тангенциальной составляющей поля над поверхностью объекта в плоскости, перпендикулярной продольной оси трещины, будет иметь вид параболы, ветви которой направлены вниз, т. к. в формировании ее поля будет участвовать только тангенциальная составляющая внешнего поля (у трещины нет «дна»). Аналогичный вид будет иметь и остаточное поле, создаваемое в той же плоскости магнитным отпечатком на ленте, если запись происходит на линейном участке ее характеристики. При считывании записи с магнитной ленты на экране дефектоскопа будет наблюдаться дипольный сигнал, т. к. считывающий узел дефектоскопа содержит дифференциальные магнитные головки, т. е. сиг-

налограмма будет иметь вид производной от графика зависимости напряженности остаточного поля дефекта, записанного на ленту, от расстояния (см. рис. 1, а).

Если дефект широкий (углубление от неровностей, риска), то магнитное поле рассеяния от «дна» дефекта будет в несколько раз больше поля, вызванного стенками дефекта. Тангенциальная составляющая поля в плоскости, перпендикулярной продольной оси углубления, обусловленного магнитными полюсами «дна», имеет вид синусоиды, ограниченной одной положительной и одной отрицательной ветвью, однако на это поле налагается тангенциальная составляющая поля от стенок углубления, имеющая вид параболы, ветви которой направлены вниз. Производная от такой суммарной кривой принимает незначительно искаженный однополярный вид (см. рис. 1, б).

Если, согласно техническим условиям на объект, трещины в нем недопустимы, то полученной информации будет достаточно, чтобы или отметить место расположения такого дефекта на поверхности объекта и впоследствии устранить его, или забраковать изделие. Другими словами, в качестве информативного параметра контроля в этом случае выступает не размах или длитель-

ность сигнала, а его вид – *сигнал двупольный* или *несколько искаженный однопольный сигнал* [7, 8].

3. Раздельное обнаружение компактных и протяженных дефектов, ориентированных вдоль шва.

Если на поверхности объекта контроля выпуклости шва нет, то направление намагничивания объекта с целью обнаружения компактных дефектов не имеет значения, т. к. в плоскостях, параллельных поверхностям свариваемых пластин, дефекты (поры, шлаковые включения) имеют округлую форму. При наличии выпуклости шва одиночные дефекты удовлетворительно обнаруживаются, если объект контроля намагнитить вдоль продольной оси шва. В этом случае выпуклость шва не оказывает размагничивающего действия, т. к. на ней не образуются магнитные полюсы, создающие поле, направленное навстречу внешнему полю, и сварной шов намагничен до индукции металла свариваемых пластин. Намагничивание протяженного объекта с целью обнаружения компактных дефектов осуществляют подвижным электромагнитом с П-образным сердечником, полюсы которого имеют проемы для прохождения в них сварного шва с прижатой к его поверхности магнитной лентой. Если сварной шов не кольцевой, то на участках начала и конца шва, находящихся под крайними полюсами электромагнита и на некотором расстоянии от них, дефекты не обнаруживаются, т. к. шов на этих участках намагничивается в основном перпендикулярно поверхности либо магнитное сопротивление цепи «электромагнит – воздушный зазор – изделие» слишком велико и эти участки намагничены слабо. Чтобы уверенно обнаружить дефекты в них, целесообразно к объекту у начала и конца шва пристыковать технологические пластины, имеющие такую же толщину, как и свариваемые детали, и изготовленные из того же материала.

Намагничивание следует начинать, когда хотя бы один полюс электромагнита находится над одной технологической пластиной, и заканчивать, когда оба полюса окажутся над другой технологической пластиной [9].

При намагничивании вдоль шва не выявляются даже очень крупные протяженные несплошности, ориентированные вдоль его продольной оси, т. к. они не создают возмущения магнитного потока. Такие дефекты обнаруживаются при намагничивании объекта поперек шва, поскольку вектор напряженности поля будет направлен перпендикулярно плоскости дефекта. При этом неудовлетворительно обнаруживаются одиночные компактные несплошности, т. к. шов намагничен слабо из-за сильного размагничивающего действия поля выпуклости шва.

Поэтому целесообразно компактные и протяженные дефекты контролировать раздельно, намагничивая объект по-разному, но всегда считывая запись с ленты вдоль ее поляризации.

4. Неблагоприятные размеры выпуклости шва.

Как отмечалось ранее [10], при магнитографическом контроле сварных соединений с неблагоприятными размерами выпуклости шва (отношение ширины шва к высоте выпуклости меньше 7) целесообразно при намагничивании шва в поперечном направлении применять концентраторы магнитной индукции (КМИ). Они представляют собой две пластины, изготовленные из магнитомягкого материала и крепящиеся к полюсам электромагнита с П-образным сердечником. Рабочие грани КМИ располагаются в зоне контролируемого сварного шва. Иногда в качестве КМИ используют искусственный дефект, поле рассеяния которого подмагничивает контролируемый сварной шов [10]. Это позволяет в несколько раз увеличить напряженность магнитного поля в зоне сварного шва и, как следствие, чувстви-

тельность метода при обнаружении дефектов.

Проведенные исследования показали, что в случае двустороннего шва целесообразно намагничивание осуществить, используя подмагничивающую схему (концентраторы магнитной индукции) в виде двух пластин прямоугольного сечения, рабочие грани которых расположены на расстоянии 4...6 мм друг от друга, причем продольная ось зазора должна быть ориентирована под углом не более 10° к продольной оси шва в процессе перемещения устройства вдоль шва. Расстояние между поверхностью концентраторов магнитной индукции не должно превышать 1 мм [10–13]. При этом магнитная лента должна находиться на обратной выпуклости шва.

В случае одностороннего сварного соединения, при отсутствии подхода к обратной стороне объекта, рационально использовать концентраторы магнитной индукции, рабочие грани которых находятся над краями выпуклости шва, а сами пластины – на высоте 1 мм от поверхности выпуклости шва [10, 14]. При этом шов намагничивается сильнее и более равномерно в поперечном направлении.

Менее предпочтительно, но иногда более удобно, применять подмагничивающую систему в виде двух пластин, уложенных на поверхность свариваемых деталей на одинаковом расстоянии от краев шва, на расстоянии 35 мм друг от друга [10, 15].

Применение КМИ в различном исполнении можно объяснить следующим. Если построить график зависимости горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля над КМИ от расстояния Δ между их рабочими поверхностями при постоянной напряженности поля, создаваемого электромагнитом, то окажется, что сна-

чала напряженность поля резко возрастает до $\Delta = 4...6$ мм, а затем плавно убывает. Максимальное значение напряженности этого поля превышает поле, создаваемое электромагнитом, в 4–4,5 раза. То есть предпочтительно, чтобы Δ было по возможности минимальным. Однако это расстояние ограничивается, во-первых, шириной выпуклости шва, во-вторых, КМИ сами создают неоднородное поле вблизи рабочих граней пластин, что приводит к появлению помех на сигналограмме.

5. Повышение разрешающей способности метода.

Если намагничивающее поле невелико, т. е. $H_0 < H(\mu_{\max})$, то поля компактных дефектов удлиняются вдоль направления внешнего поля. При оптимальных режимах намагничивания магнитные поля рассеяния компактных дефектов вытягиваются перпендикулярно вектору напряженности намагничивающего поля. Линии равных значений напряженности магнитного поля на поверхности объекта контроля имеют вид эллипсов (рис. 2), причем их большие оси перпендикулярны вектору напряженности намагничивающего поля.

Поэтому при намагничивании изделия вдоль цепочки несплошностей поля компактных дефектов будут удлиняться поперек цепочки и станут перекрываться при меньшем расстоянии между дефектами по сравнению со случаем намагничивания изделия поперек цепочки дефектов (см. рис. 2 и 3). При этом разрешающая способность метода возрастает от 10 до 40 раз и зависит от глубины залегания дефекта. Чем меньше глубина залегания дефекта, тем выше разрешающая способность метода контроля. Так, удастся различить две находящиеся под краской или заполненные шлаком поры наружной поверхности объекта даже в том случае, если они перекрываются.

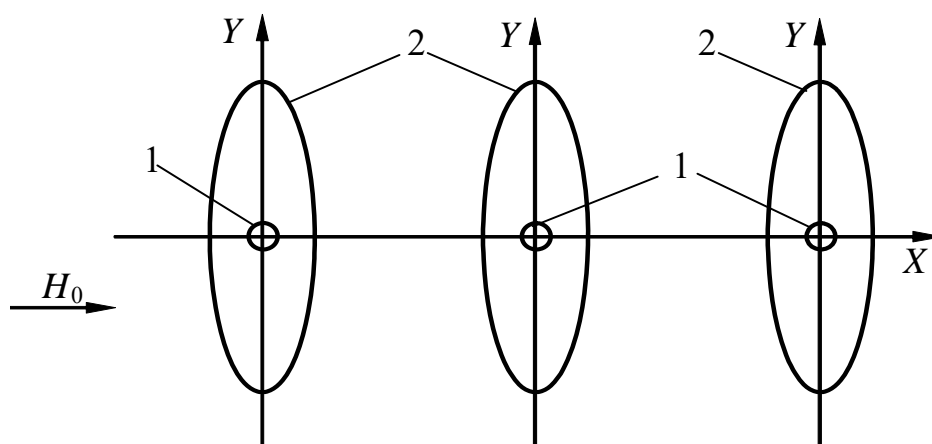


Рис. 2. Ориентация полей компактных дефектов при намагничивании объекта контроля вдоль цепочки несплошностей: 1 – дефект; 2 – линии равных значений напряженности магнитного поля в зоне компактных дефектов

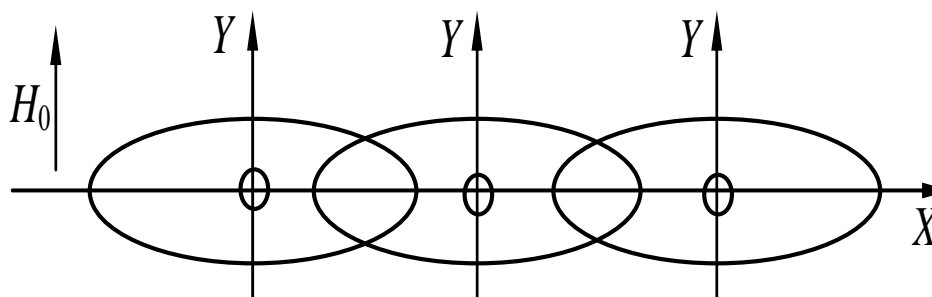


Рис. 3. Ориентация полей компактных дефектов при намагничивании объекта контроля поперек цепочки несплошностей

6. Одностороннее сварное соединение (косвенный метод).

Известно, что в одностороннем стыковом соединении при полном проплавлении свариваемых деталей появляется выпуклость обратной стороны шва, что свидетельствует об отсутствии непровара в корне шва. Края этой выпуклости находятся между плоскостью симметрии шва и краями выпуклости наружного шва, где шов при магнитографическом контроле намагничен достаточно сильно. Поэтому резкое изменение сечения шва в местах перехода от обратной выпуклости к основному металлу приводит к изменению топографии тангенциальной составляющей по-

ля на поверхности соединения, что может быть обнаружено при магнитографическом контроле и косвенно свидетельствовать об отсутствии непровара в корне шва.

Эксперименты проводили на образце толщиной 6 мм, который имел наружную выпуклость шва шириной 10,9 мм, высотой 2,45 мм и обратную выпуклость шириной 7,8 мм, высотой 2,2 мм. Коэффициент формы наружной выпуклости шва составлял 4,4 (меньше 5), внутренней – 3,5 (при контроле односторонних швов обратную выпуклость, естественно, видеть не можем). То есть сварной шов образца оказался с неблагоприятными размерами выпукло-

сти шва (коэффициент формы наружной выпуклости шва значительно меньше 7) и, следовательно, чрезвычайно неудобным для контроля. Поэтому для намагничивания шва использовали концентраторы магнитной индукции (КМИ), которые располагались непосредственно на сваренных пластинах. Толщина КМИ составляла 6 мм, расстояние между их плоскими рабочими поверхностями

– 35 мм. Измерение напряженности поля в отдельных точках сварного соединения и вне выпуклости шва производили с помощью проградуированных ленточных локальных магдиноносителей по известной методике.

Характер изменения тангенциальной составляющей напряженности поля в зоне сварного соединения показан на рис. 4.

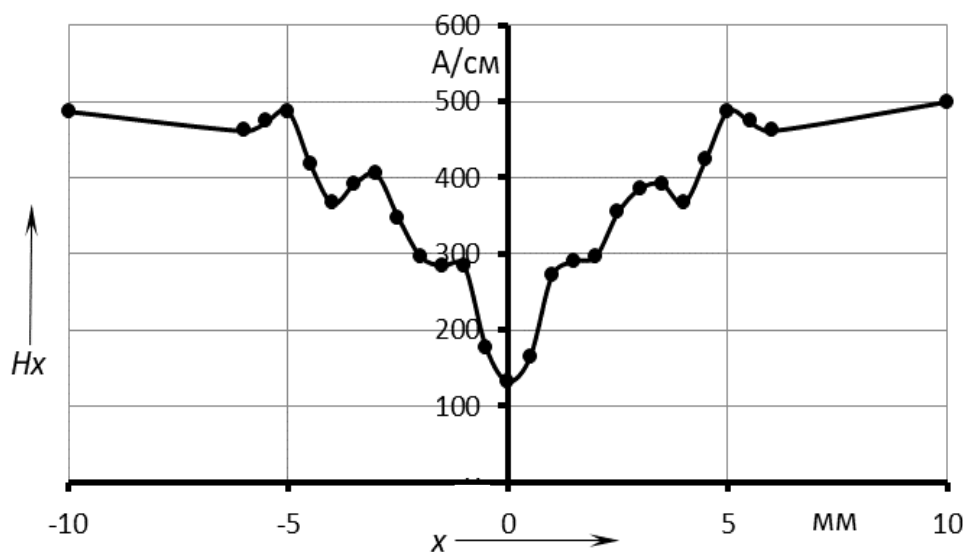


Рис. 4. Изменение тангенциальной составляющей результирующего поля на поверхности одностороннего сварного соединения с полным проплавлением: ширина наружной выпуклости шва $\sigma_1 = 10,9$ мм, высота $c_1 = 2,45$ мм; ширина обратной выпуклости шва $\sigma_2 = 7,8$ мм, высота $c_2 = 2,2$ мм

Как видно из рисунка, топография результирующего поля отличается от традиционной (когда отсутствует обратная выпуклость шва): между минимумом кривой в плоскости симметрии шва и максимумами, соответствующими краям наружной выпуклости шва, появились два симметрично расположенных максимума, соответствующих краям обратной выпуклости шва. Все это неизбежно должно было отразиться на сигналограмме, вид которой представлен на рис. 5.

Как видно из рис. 5, краям обратной выпуклости шва соответствуют два одинаковых кососимметрично расположенных сигнала 1 синусоидальной фор-

мы, что свидетельствует о наличии обратной выпуклости, а следовательно, об отсутствии непровара в сварном соединении. То, что сигнал размахом A не является сигналом от дефекта, можно понять из рассмотрения сигналограмм, представленных на рис. 5 и 6, б. В случае сигнала, обусловленного дефектом (форма синусоидальная с положительной и отрицательной полуволнами), его ветви являются продолжением сигналов синусоидальной формы, обусловленных краями наружного валика шва. При наличии обратной выпуклости шва отрезок прямой на сигналограмме соединяет кососимметрично расположенные сигналы небольшого размаха (см. рис. 5).

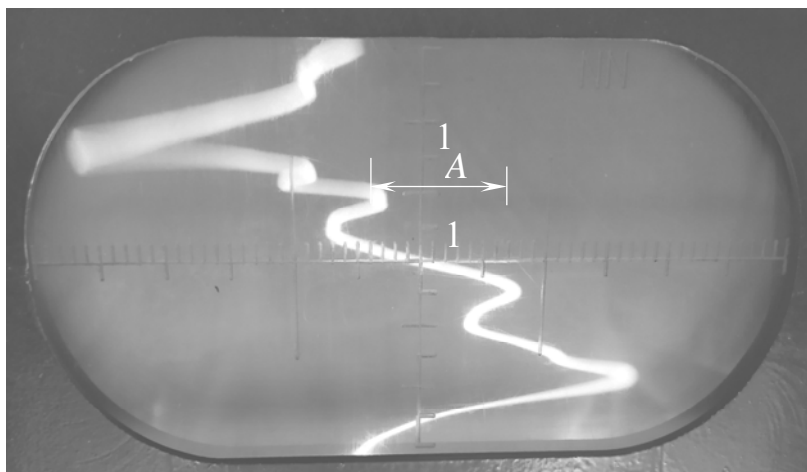


Рис. 5. Вид сигналограммы при магнитографическом контроле сварного соединения с выпуклостью обратной стороны шва (с полным проплавлением)

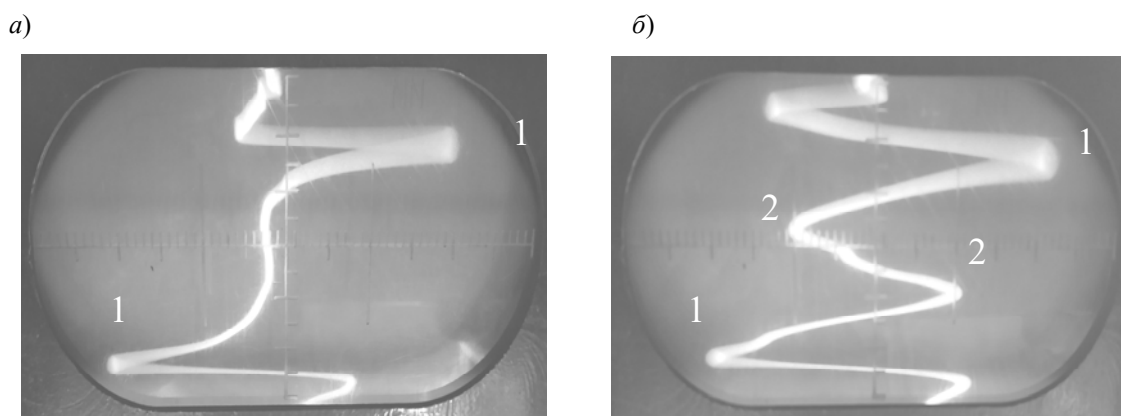


Рис. 6. Вид сигналограммы на экране дефектоскопа при отсутствии выпуклости обратной стороны шва: *a* – в шве нет дефекта; *б* – в шве есть дефект; 1 – помехи, обусловленные наружной выпуклостью шва; 2-2 – сигнал, обусловленный дефектом

Таким образом, определен информативный параметр обратной выпуклости одностороннего шва при магнитографическом контроле соединений, выполненных с полным проплавлением (т. е. при отсутствии непровара в корне шва), – присутствие двух одинаковых кососимметрично расположенных сигналов на сигналограмме, соответствующих местам перехода от обратной выпуклости шва к основному металлу.

7. Соединения, выполненные на остающейся подкладке.

Трещины в сварных соединениях, выполненных на остающейся подкладке, располагаются не в плоскости сим-

метрии шва, а в месте перехода шва через зазор между остающейся подкладкой и свариваемыми пластинами, где напряженность результирующего поля при намагничивании соединения в поперечном направлении 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 подкладок, регламентируемых стандартами на сварку [14, 15].

Так как при сварке под слоем флюса стандарт ограничивает только минимальные размеры подкладок, то магнитографический метод можно рекомендовать для контроля таких объектов.

Заключение

Проанализированы основные недостатки существующих методик магнитографического контроля различных

объектов. Рассмотрен ряд высокоэффективных способов намагничивания, магнитного и магнитографического контроля. Подробно описаны причины повышения достоверности контроля в каждом случае. Показано, что данные способы могут быть использованы для усовершенствования методик контроля различных объектов с учетом конструктивно-технологических особенностей изделий, вида и типа обнаруживаемых дефектов, особых условий эксплуатации объектов. Это позволит разработать универсальную методику магнитографического контроля изделий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фалькевич, А. С.** Магнитографический контроль сварных соединений / А. С. Фалькевич, М. Х. Хусанов. – М.: Машиностроение, 1966. – 176 с.: ил.
2. Авторское свидетельство SU 242468. Способ магнитографического контроля изделий из ферромагнитных материалов : опубл. 25.04.1969 / Фещенко Ю. Б.
3. **Новиков, В. А.** Магнитный контроль в вопросах и ответах / В. А. Новиков. – Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2020. – 347 с.
4. Авторское свидетельство SU 1229671. Способ магнитографического контроля изделий из ферромагнитных материалов : опубл. 07.05.1986 / Шарова А. М., Новиков В. А., Юдчиц М. В.
5. Авторское свидетельство SU 1589193. Способ магнитографического контроля изделий из ферромагнитных материалов : опубл. 30.08.1990 / Новиков В. А.
6. Патент RU 2154818, МКИ⁷ G01N 27/72. Способ магнитографического контроля ферромагнитных изделий : № 96111357/28 : заявлено 03.06.1996 : опубл. 20.08.2000 / Новиков В. А. – 8 с. : ил.
7. **Новиков, В. А.** Экспериментальное исследование магнитографического контроля объектов при их намагничивании перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель / В. А. Новиков, А. В. Кушнер, А. В. Шилов // Дефектоскопия. – 2010. – № 7. – С. 42–50.
8. **Кушнер, А. В.** Повышение эффективности магнитографического метода контроля при намагничивании изделий перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 / Кушнер Андрей Валерьевич ; Бел.-Рос. ун-т. – Могилев, 2011. – 24 с.
9. Авторское свидетельство SU 1786417. Способ магнитографического контроля стыковых сварных соединений : опубл. 07.01.1993 / Новиков В. А., Романов В. А.
10. **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. – С. 90–99.
11. Авторское свидетельство SU 1672345. Способ магнитографического контроля : опубл. 23.08.1991 / Новиков В. А.
12. Авторское свидетельство SU 1546898. Способ намагничивания при контроле ферромагнитных изделий : опубл. 28.02.1990 / Новиков В. А.
13. Авторское свидетельство SU 1793359. Способ магнитографического контроля стыковых сварных швов : опубл. 07.02.1993 / Новиков В. А., Романов В. А.
14. Авторское свидетельство SU 1422125. Способ магнитографического контроля : опубл. 07.09.1988 / Новиков В. А.
15. Авторское свидетельство SU 1196746. Способ магнитографического контроля сварных соединений : опубл. 07.12.1985 / Шарова А. М., Новиков В. А., Магилинский А. П.

Статья сдана в редакцию 2 февраля 2026 года

Контакты:

novikov.bru@yandex.by (Новиков Владимир Алексеевич);

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

V. A. NOVIKOV, V. G. PANTYUSHINA

KEY PREREQUISITES FOR DEVELOPING A UNIVERSAL METHOD FOR MAGNETOGRAPHIC TESTING OF FERROMAGNETIC OBJECTS

Abstract

The main disadvantages of existing techniques for the magnetographic testing of various objects are analyzed. A number of highly effective methods for magnetization, as well as magnetic and magnetographic testing, are considered. It is shown that they can be used to improve testing procedures, taking into account the design and technological features of products, the type and kind of defects to be detected, and the special operating conditions of the objects.

Keywords:

non-destructive testing, magnetographic method, discontinuities, testing methodology.

For citation:

Novikov, V. A. Key prerequisites for developing a universal method for magnetographic testing of ferromagnetic objects / V. A. Novikov, V. G. Pantyushina // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2026. – № 2 (91). – P. 79–88.