

---

---

УДК 620.179.1

*В. А. Новиков, А. В. Шилов*

---

---

**ГРАНИЦЫ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИЗУАЛИЗИРУЮЩЕЙ ПОЛЯ ПЛЕНКИ**

---

---

UDC 620.179.1

*V. A. Novikov, A. V. Shilov*

---

---

**APPLICATION LIMITS OF THE MAGNETIC METHOD OF TESTING BY MEANS  
OF A FIELD VIEWING FILM**

---

---

**Аннотация**

Установлена зона удовлетворительной выявляемости дефектов при использовании для контроля ферромагнитных объектов визуализирующей магнитные поля пленки. Экспериментально определено положение ее границ в зависимости от режима намагничивания, диаметра и глубины залегания дефекта, параметров электромагнита, положения магнитной пленки на объекте по отношению к электромагниту. В области удовлетворительной выявляемости дефектов исследованы особенности трансформации индикаторных рисунков компактных и протяженных внутренних дефектов на пленке при изменении их параметров и взаимного расположения.

**Ключевые слова:**

магнитный контроль, визуализация магнитного поля, дефекты сплошности, индикаторные рисунки дефектов, границы применения, условия контроля.

**Abstract**

The zone of satisfactory detection of defects by using the field viewing film has been determined to control ferromagnetic objects. Its boundaries have been experimentally defined depending on the mode of magnetization, the defect diameter and its depth, electromagnet parameters and the position of the magnetic film on an object relative to the electromagnet. Within the zone of satisfactory detection of defects the peculiarities of the transformation of indicator pictures of compact and extended internal defects on the film have been determined when their parameters and mutual arrangement change.

**Key words:**

magnetic control, visualization of the magnetic field, integrity defects, indicator pictures of defects, application limits, testing conditions.

---

Для успешного использования методов неразрушающего контроля материалов и изделий необходимо определить границы их применения. Так, магнитографический метод контроля используют в основном для обнаружения дефектов в сварных швах. При этом рекомендуют изделие намагничивать таким образом, чтобы магнитная лента находилась в зоне однородного поля намагничивающего устройства. Границы применения метода определяются

толщиной объекта от 2 до 25 мм, ограничения налагают также на параметры выпуклости шва [1–3].

При магнитопорошковом методе одновременно контролируют большие площади объектов. Высокие требования предъявляют к качеству подготовки контролируемой поверхности. При контроле способом приложенного поля с намагничиванием контролируемой зоны приставным П-образным электромагнитом в межполюсном пространстве объ-

екта имеются зоны неудовлетворительной выявляемости наружных дефектов. Это участки поверхности шириной от 10 до 25 мм, прилегающие к полюсам электромагнита [4, 5]. Наличие зон нечувствительности объясняется тем, что частицы магнитного порошка удаляются пондеромоторной силой, обусловленной неоднородностью магнитного поля, вблизи полюсов магнита.

Магнитный метод контроля, основанный на применении визуализирующей магнитные поля пленки, обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами. Это высокая оперативность, возможность обнаружения дефектов в объектах с грубой поверхностью, простота осуществления, многократное использование магнитной пленки, наглядность результатов контроля, отсутствие необходимости в специальных приборах для обнаружения дефектов. Он позволяет количественно оценить дефекты с учетом глубины их залегания. Для обеспечения высокой достоверности обнаружения дефектов следует определить границы применения метода с учетом режима намагничивания, глубины залегания и величины дефекта, параметров электромагнита, положения магнитной пленки на объекте по отношению к электромагниту. Целесообразно также исследовать особенности трансформации индикаторных рисунков компактных и протяженных внутренних дефектов на пленке при изменении их параметров и взаимного расположения.

Исследования проводили на образцах из горячекатаной стали и стального литья. Образцы имели вид параллелепипеда размерами 330×40×25 мм и пластин габаритами 400×300×30 мм, которые учитывали растекание магнитного потока в изделии. В образцах в форме параллелепипеда были выполнены отверстия диаметром 2, 4 и 6 мм на различной глубине, с шагом 2,5 мм, параллельно поверхности 330×40 мм. Кроме того, на наружной поверхности образца была

профрезерована канавка шириной 0,5 и глубиной 1 мм. Торцевые поверхности литых пластин размерами 400×30 мм были обработаны до параметра шероховатости Rz 320. В них были выполнены углубления диаметром 4 мм и протяженностью 40 мм на глубине 16 и 25 мм параллельно поверхности 400×300 мм пластины. Размеры искусственных дефектов в литых образцах соответствовали минимальному браковочному уровню на реальный объект контроля – опору автомобиля БелАЗ. Были изготовлены также сварные образцы толщиной 12 мм со снятой выпуклостью шва. Они содержали скопления внутренних несплошностей размером 2...3 мм, одиночные шлаковые включения диаметром 6 мм и протяженные трещины.

Намагничивание объектов производили электромагнитом с П-образным сердечником: сечение полюса 170×60 мм, число витков провода диаметром 1,4 мм – 550. Напряжение на обмотку электромагнита подавали от источника постоянного тока IRPS 60В/20А. Для записи полей рассеяния дефектов применяли пленку, визуализирующую магнитные поля.

Установлено, что при намагничивании образцов толщиной более 25 мм электромагнитом с межполюсным расстоянием 90 мм (сечение полюса 170×60 мм) на пленке появляется помеха, вызванная полем намагничивающего устройства и проявляющаяся в виде светлой полосы, расположенной параллельно полюсам намагничивающего устройства. Так, при намагничивании объектов толщиной 30 мм ширина этой полосы составляет около 15 мм (рис. 1). Ширина полосы уменьшается, а ее яркость возрастает при увеличении зазора между полюсами и поверхностью объекта. Наличие дефекта сплошности, находящегося в объекте под этой полосой, может установить оператор с большим опытом работы. При увеличении межполюсного расстояния электромагнита, уменьшении толщины стенки контролируемого объекта ширина полосы

увеличивается, а ее яркость снижается. Например, в образцах толщиной 30 мм при расстоянии между полюсами электромагнита 200 мм эта помеха становится малозаметной.

Методика проведения исследований по определению зоны удовлетворительной выявляемости дефектов заключалась в следующем. Стальной образец размерами 330×40×25 мм укладывали

на полюсы П-образного электромагнита, затем на контролируемую поверхность помещали магнитную пленку и образец намагничивали. Исследования выполняли для двух случаев. В одном из них электромагнит и пленку располагали с одной стороны образца (рис. 2, а), во втором – с противоположных сторон (рис. 2, б).

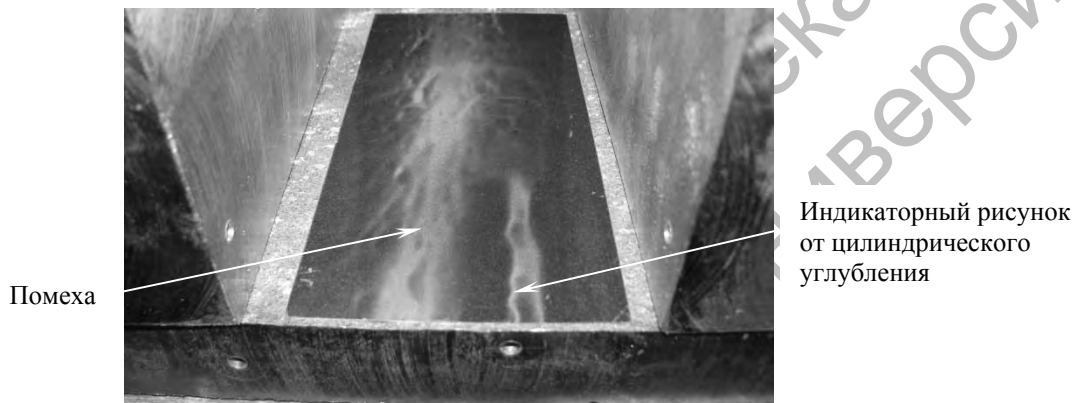


Рис. 1. Индикаторный рисунок внутреннего цилиндрического углубления диаметром 4 мм на расстоянии 6,5 мм от поверхности в литом образце толщиной 30 мм с грубой поверхностью при расстоянии между полюсами электромагнита 90 мм

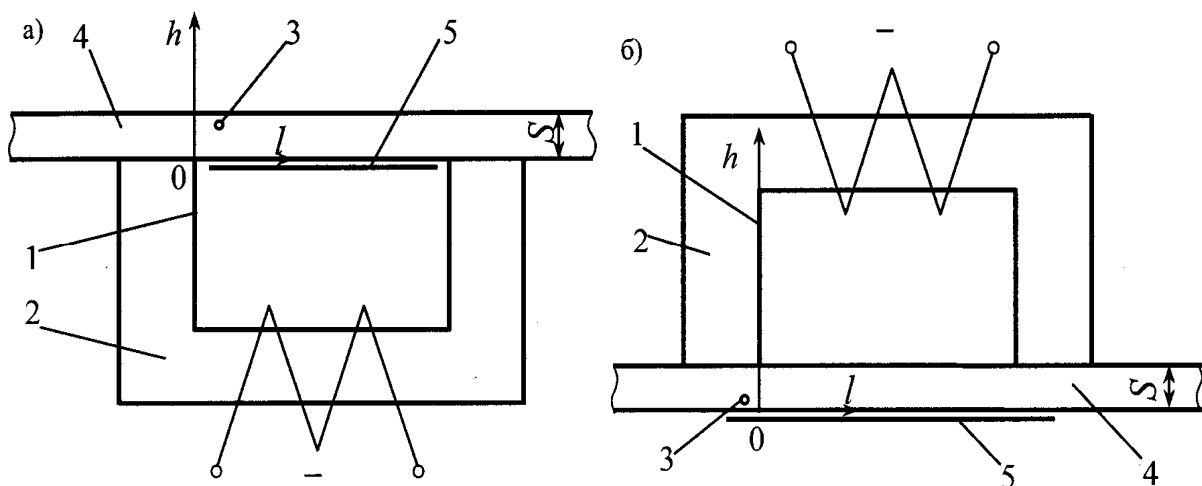


Рис. 2. Схемы намагничивания: а – пленка и электромагнит находятся с одной стороны контролируемого образца; б – пленка и электромагнит находятся с противоположных сторон образца; 1 – плоскость внутренней грани полюса электромагнита; 2 – электромагнит; 3 – внутренний дефект; 4 – образец; 5 – пленка, визуализирующая магнитные поля

Положительная ось ординат  $h$  (см. рис. 2) находится в плоскости внутренней грани 1 полюса электромагнита 2, ближайшего к дефекту 3, и направлена в сторону объекта 4. Положительная ось абсцисс  $l$  совпадает с поверхностью образца 4, на которую уложена пленка 5, визуализирующая магнитные поля, и направлена в сторону второго полюса электромагнита. После обнаружения индикаторного рисунка дефекта на визуализирующей магнитные поля пленке последовательно перемещали электромагнит и (или) образец, приближая дефект к внутренней грани ближайшего полюса электромагнита. Образец контролировали на наличие этого дефекта. Взаимное перемещение образца и (или) электромагнита и контроль образца производили до тех пор, пока не начал исчезать индикаторный рисунок дефекта на пленке (при дальнейшем приближении дефекта к внутренней

грани полюса электромагнита дефект не обнаруживался). Замеряли расстояние  $l$  от этой грани полюса магнита до индикаторного рисунка дефекта. Строили график зависимости  $l(h)$  для случаев, когда магнитоноситель и электромагнит находились с одной (рис. 3) или с противоположных сторон образца (рис. 4).

Из рис. 3 видно, что ширина зоны нечувствительности, примыкающей к полюсу электромагнита, зависит от диаметра дефекта и глубины его залегания для электромагнита с сечением полюса  $170 \times 60$  мм и межполюсным расстоянием 200 мм.

Если же пленка и электромагнит находятся с противоположных сторон образца, то зона уверенного обнаружения дефектов выходит за пределы плоскости внутренней грани полюса электромагнита (см. рис. 4) и также зависит от диаметра и глубины залегания дефекта.

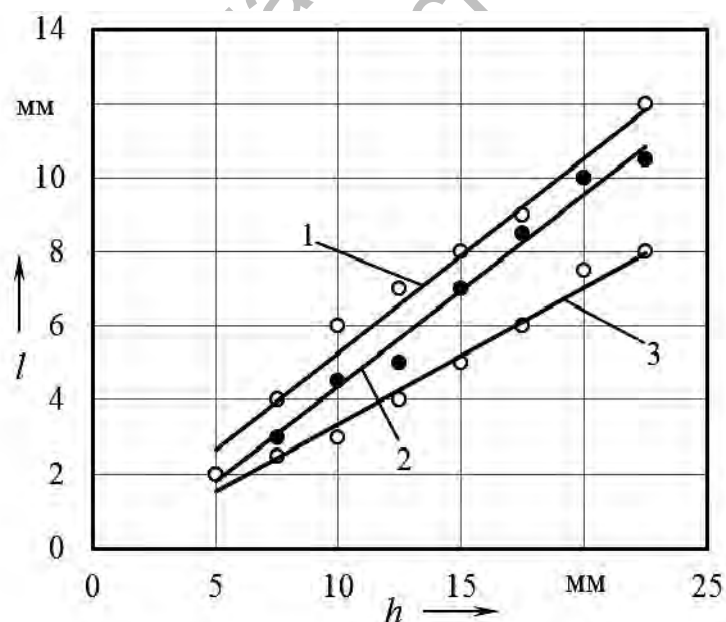


Рис. 3. Зависимость ширины зоны нечувствительности от глубины залегания дефекта, когда электромагнит и магнитоноситель расположены с одной стороны объекта: напряженность намагничивающего поля 500 А/см; толщина образца 25 мм; 1 – диаметр дефекта 6 мм; 2 – диаметр дефекта 4 мм; 3 – диаметр дефекта 2 мм

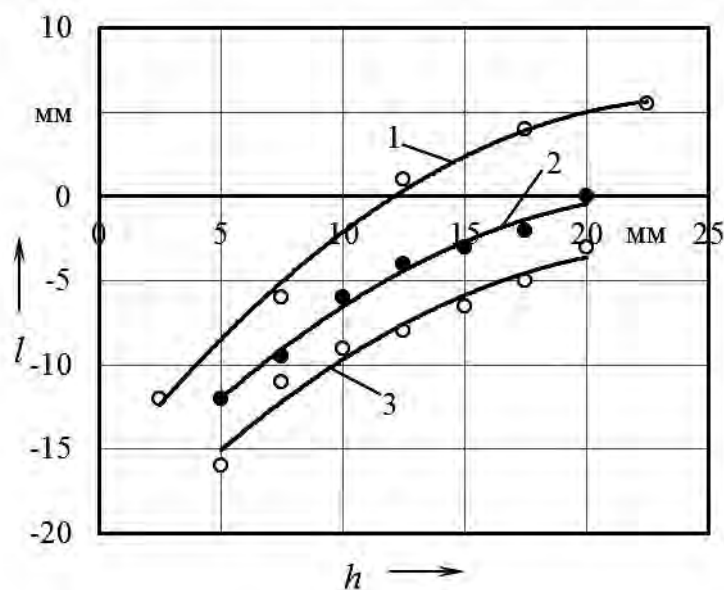


Рис. 4. Зависимость ширины зоны нечувствительности от глубины залегания дефекта, когда электромагнит и магнитоноситель расположены с противоположных сторон образца: напряженность намагничивающего поля 500 А/см; толщина образца 25 мм; 1 – диаметр дефекта 2 мм; 2 – диаметр дефекта 4 мм; 3 – диаметр дефекта 6 мм

Исследование влияния высоты полюсов электромагнита на выявляемость дефектов при перемещении электромагнита производили на образце толщиной 25 мм с цилиндрическими отверстиями диаметром 2 мм, выполненными на различной глубине с шагом 2,5 мм. Эксперименты по определению границы зоны нечувствительности проводили по приведенной выше методике на электромагнитах с высотой полюсов 70, 85, 115 и 160 мм. Все параметры электромагнитов, кроме высоты полюсов, были постоянные. Результаты измерений для случая, когда электромагнит и пленка расположены с одной стороны образца, представлены на рис. 5. Из рисунка следует, что высота полюсов электромагнита практически не оказывает влияния на ширину зоны нечувствительности при постоянной глубине залегания дефекта.

Для исследования влияния межполюсного расстояния П-образного электромагнита на ширину зоны нечувствительности в образце, когда пленка и электромагнит находятся с одной стороны образца, использовали сердечники

длиной 90, 120, 160, 180 и 200 мм. График зависимости ширины зоны нечувствительности  $l$  от межполюсного расстояния  $L_p$  представлен на рис. 6. Из рисунка видно, что с увеличением межполюсного расстояния от 90 до 200 мм ширина зоны нечувствительности изменяется от 4 до 7 мм по линейному закону.

Влияние режима намагничивания на ширину зоны нечувствительности исследовали на образце толщиной 25 мм с отверстиями диаметром 2 мм, выполненными на глубине от 2,5 до 22,5 мм с шагом 5 мм. Эксперименты проводили при напряженности поля от 160 до 650 А/см по описанной выше методике. Результаты исследований представлены на рис. 7. Из рисунка видно, что ширина зоны нечувствительности уменьшается с ростом глубины залегания дефекта и увеличением напряженности намагничивающего поля. Так, при напряженности поля 160 А/см и глубине залегания дефекта 22,5 мм это расстояние составляет 23 мм, а при напряженности поля 480 А/см и глубине залегания 2,5 мм – 3 мм.

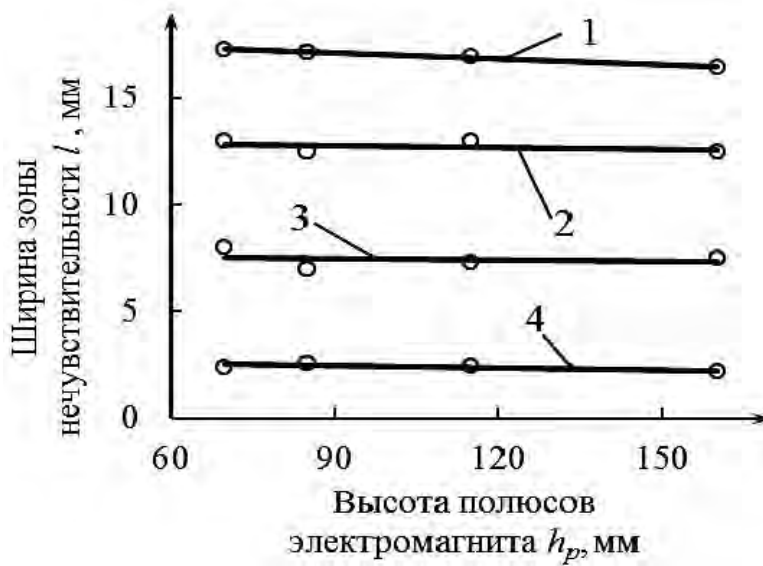


Рис. 5. Зависимость ширины зоны нечувствительности от высоты полюсов электромагнита при различной глубине залегания дефекта: 1 – глубина залегания 17,5 мм; 2 – 12,5 мм; 3 – 7,5 мм; 4 – 2,5 мм

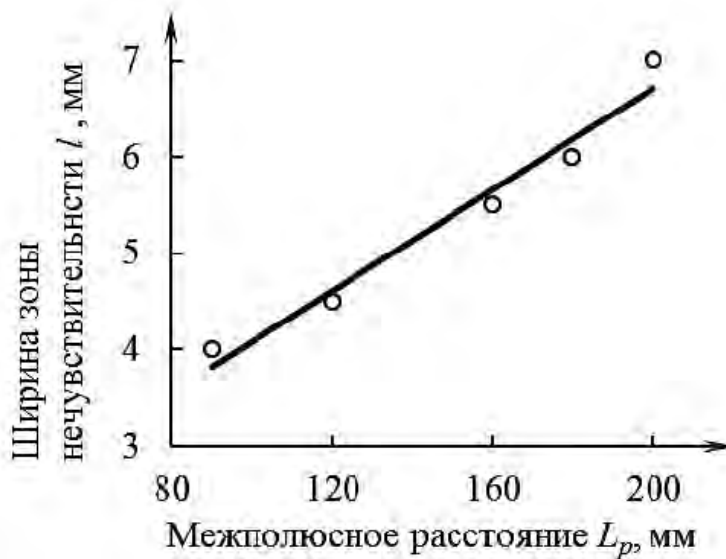


Рис. 6. Зависимость ширины зоны нечувствительности от расстояния между полюсами электромагнита

Проведенные исследования показали, что если электромагнит и пленка находятся с одной стороны образца, то для поверхностного дефекта зоны нечувствительности в межполюсном пространстве электромагнита отсутствуют. Наличие таких зон при магнитопорошковом контроле объясняется тем, что частицы магнитного порошка удаляют-

ся пондеромоторной силой вследствие неоднородного поля вблизи полюсов магнита. В визуализирующей поля пленке магнитные частицы находятся в геле, помещенном в небольшие капсулы, закрепленные на немагнитной подложке, и могут перемещаться только в пределах капсулы. Поэтому для поверхностных дефектов зоны нечувствитель-

ности отсутствуют. Трещины уверенно обнаруживаются в непосредственной близости от полюса. Если электромагнит и пленка находятся по разные стороны образца, то поверхностные дефек-

ты обнаруживаются, даже если они находятся над полюсом электромагнита, приблизительно на расстоянии половины толщины образца.

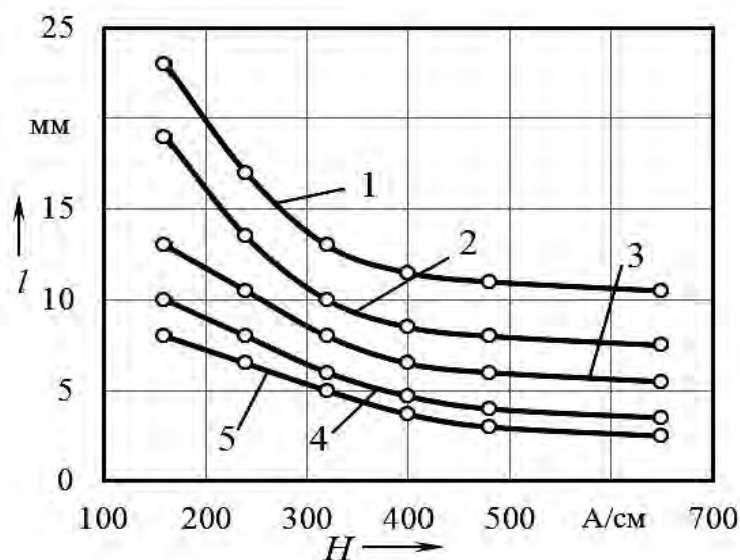


Рис. 7. Зависимость ширины зоны нечувствительности от напряженности намагничивающего поля для глубины залегания: 1 –  $h = 22,5$  мм; 2 –  $h = 17,5$  мм; 3 –  $h = 12,5$  мм; 4 –  $h = 7,5$  мм; 5 –  $h = 2,5$  мм

Таким образом, установлено, что на ширину зон нечувствительности, примыкающих к полюсам электромагнита с П-образным сердечником, когда визуализирующая магнитные поля пленка и электромагнит находятся с одной стороны образца, влияют глубина залегания и диаметр дефекта, расстояние между полюсами и режим намагничивания. Следовательно, если для контроля объекта, представляющего собой пластину с выполненными в ней технологическими цилиндрическими отверстиями известного диаметра, использовать электромагнит с известными параметрами, а контроль осуществлять при конкретном режиме намагничивания, то можно определить глубину залегания отверстия (по предварительно построенному графику зависимости ширины зоны нечувствительности от глубины залегания) и его диаметр (если известна глубина залегания).

Установлено, что при контроле образцов с крупными протяженными дефектами (диаметром 4...6 мм), параллельными поверхности и находящимися на небольшом расстоянии друг от друга (до 12 мм), на визуализирующей магнитные поля пленке наблюдается широкая светлая полоса, а по обе ее стороны – темные полосы, т. е. несколько дефектов воспринимаются как один дефект большей ширины. Увеличение расстояния между дефектами (до 30...40 мм) приводит к появлению отдельных индикаторных рисунков, между которыми отмечаются светлые полосы. Это объясняется тем, что тангенциальная составляющая поля дефекта по мере удаления от плоскости его симметрии вначале убывает до минимума, а затем возрастает, причем суперпозиция тангенциальных составляющих полей на одинаковом расстоянии от дефектов может достигать значительной величины и вы-

звать появление светлой полосы на пленке. Дальнейшее увеличение расстояния между дефектами приводит к «размыванию» между ними светлой полосы на пленке.

На рис. 8, а представлено изображение индикаторных рисунков трех параллельных цилиндрических отверстий диаметром 6 мм, находящихся на глубине 15, 12,5 и 10 мм в образце толщи-

ной 25 мм, выполненных на расстоянии 40 мм друг от друга при контроле образца в приложенном поле электромагнита. Как видно из рисунка, кроме индикаторных рисунков дефектов 1, появились индикаторные рисунки помех 2. Если диаметр отверстий 2 мм, то при расстоянии между ними более 20 мм светлые полосы малозаметны.

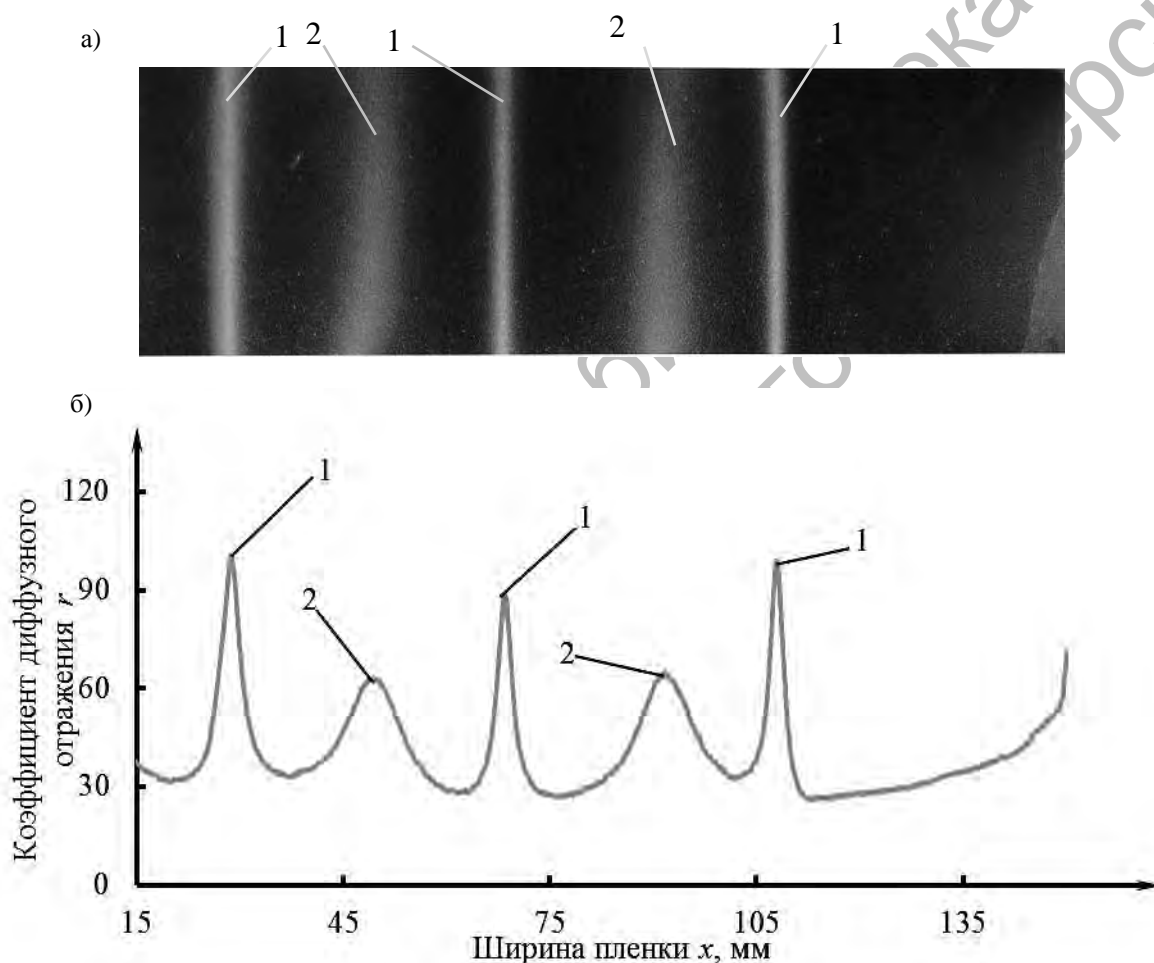


Рис. 8. Изображение индикаторных рисунков на визуализирующей магнитные поля пленке трех параллельных цилиндрических отверстий диаметром 6 мм, на глубине 15, 12,5 и 10 мм, в образце толщиной 25 мм, на расстоянии 40 мм (а) и соответствующий им график зависимости коэффициента отражения пленки от расстояния до полюса электромагнита (б)

На рис. 8, б представлен график зависимости коэффициента отражения пленки от расстояния до полюса электромагнита (методика экспериментальных исследований описана в [6]). Из ри-

сунка видно, что каждому дефекту соответствует ярко выраженный симметричный максимум 1 и два минимума по обе его стороны (см. рис. 8, б). Помехам соответствуют импульсы 2 меньшей



амплитуды и большей длительности. Дальнейшее увеличение расстояния между дефектами приводит к уменьшению помех.

На рис. 9 показаны индикаторные рисунки, обусловленные скоплениями внутренних несплошностей величиной 2...3 мм, находящихся на глубине 6 мм, при контроле в приложенном поле. Из рисунка видно, что по обе стороны следа проекции дефекта на пленке, в направлении намагничивания, наблюдается потемнение пленки. При увеличении диаметра дефекта до 6 мм это изображение трансформируется в темное пятно

овальной формы, которое с двух сторон охватывают светлые полосы (рис. 10). Такую трансформацию индикаторных рисунков дефектов можно объяснить значительным уменьшением тангенциальной составляющей поля дефекта в его средней части при увеличении диаметра дефекта.

На рис. 11 показаны индикаторные рисунки внутренних трещин в сварном шве со снятой выпуклостью, имеющие вид светлых извилистых рельефных линий, по обе стороны которых наблюдаются широкие темные полосы.

Индикаторные рисунки внутренних несплошностей

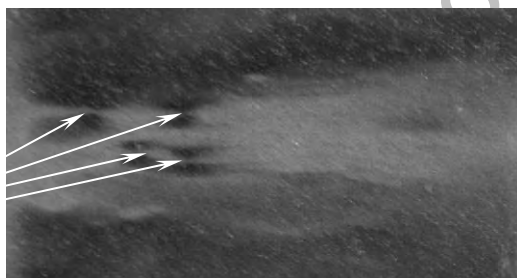


Рис. 9. Индикаторные рисунки от скопления внутренних несплошностей в образце толщиной 12 мм, находящиеся на глубине 6 мм, величиной от 2 до 3 мм

Индикаторные рисунки шлаковых включений

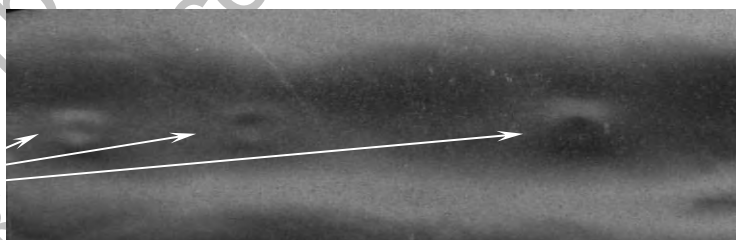


Рис. 10. Индикаторные рисунки шлаковых включений в образце толщиной 12 мм, находящиеся на глубине 6 мм

Индикаторные рисунки внутренних трещин

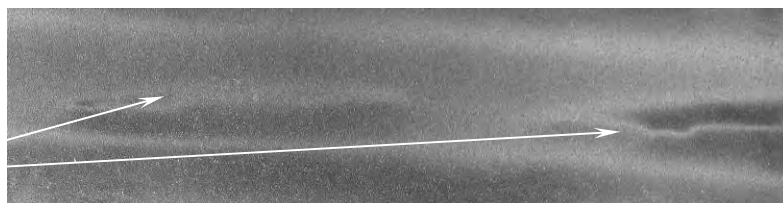


Рис. 11. Индикаторные рисунки внутренних трещин в образце толщиной 12 мм

### Заключение

При намагничивании объектов толщиной более 20 мм электромагнитом с межполюсным расстоянием меньше 90 мм на визуализирующей магнитные поля пленке, уложенной на поверхность объекта, появляется помеха в виде светлой полосы шириной 10...15 мм, расположенная параллельно полюсам электромагнита в плоскости их симметрии. Ширина полосы уменьшается, а ее яркость возрастает при увеличении зазора между полюсами и поверхностью объекта. Наличие дефекта сплошности, находящегося в объекте под этой полосой, может установить оператор, имеющий большой опыт работы. Ширина полосы значительно увеличивается, а ее яркость снижается при увеличении межполюсного расстояния электромагнита и (или) уменьшении толщины стенки контролируемого объекта. Например, в объектах толщиной 30 мм при расстоянии между полюсами электромагнита 200 мм эта помеха становится малозаметной.

Определены условия контроля ферромагнитных объектов с толщиной стенки 25...30 мм, намагничиваемых П-образным электромагнитом, имеющим сечение полюса 170×60 мм, число витков 550 и границы применения метода:

- межполюсное расстояние – 200 мм;
- напряженность намагничивающего поля при обнаружении внутренних дефектов – от 500 до 650 А/см;

- если электромагнит и пленка находятся с одной стороны образца, то поверхностные трещины в образце уверенно обнаруживаются во всем межполюсном пространстве электромагнита. При этом, в отличие от магнитопорошкового метода контроля, магнитные частицы визуализирующей поля пленки не удаляются пондеромоторной силой вследствие неоднородного поля вблизи полюсов электромагнита, т. к. находятся в геле, помещенном в небольшие капсулы, и могут перемещаться только в пределах капсул. В объекте возникают зо-

ны нечувствительности к внутренним дефектам. Эти зоны примыкают к внутренним граням полюсов электромагнита и становятся тем шире, чем больше глубина залегания дефекта, меньше его диаметр и напряженность намагничивающего поля. Зоны нечувствительности обусловлены тем, что нормальная составляющая внешнего поля возле полюсов магнита значительно больше тангенциальной компоненты, поэтому тангенциальная составляющая поля рассеяния дефекта слабо влияет на ориентацию магнитных частиц в пленке:

- если электромагнит находится с противоположной стороны объекта по отношению к пленке, то границы зон уверенного обнаружения поверхностных дефектов располагаются над полюсами магнита, и их положение зависит от толщины образца. Ухудшение обнаружения поверхностных дефектов, находящихся на большем расстоянии от внутренних граней полюсов электромагнита, объясняется резким уменьшением тангенциальной составляющей напряженности намагничивающего поля. Положение границ зоны уверенного обнаружения внутренних дефектов зависит от их диаметра и глубины залегания. Чем больше диаметр дефекта и меньше глубина его залегания, тем шире зона уверенного обнаружения внутренних дефектов в образце. Границы этой зоны могут находиться в межполюсном пространстве электромагнита и вне его.

В области удовлетворительной выявляемости дефектов установлены особенности трансформации индикаторных рисунков внутренних компактных и протяженных дефектов на пленке при изменении их параметров и взаимного расположения:

- при контроле в приложенном поле по обе стороны следа проекции компактного дефекта диаметром 2...3 мм на пленке, в направлении намагничивания, наблюдается потемнение. При увеличении диаметра дефекта до 6 мм это изображение трансформируется в темное

пятно овальной формы, которое с двух сторон охватывают светлые полосы. Такую трансформацию индикаторных рисунков дефектов можно объяснить значительным уменьшением тангенциальной составляющей поля дефекта в его средней части при увеличении диаметра дефекта;

– при контроле образцов с крупными протяженными дефектами (диаметром 4...6 мм), параллельными поверхности и находящимися на небольшом расстоянии друг от друга (до 12 мм), на визуализирующей магнитные поля пленке наблюдается широкая светлая полоса, а по обе ее стороны – темные полосы, т. е. несколько дефектов воспринимаются как один дефект большей ширины. Увеличение расстояния между дефектами (до 30...40 мм) приводит к

появлению отдельных индикаторных рисунков, между которыми отмечаются светлые полосы. Это объясняется тем, что тангенциальная составляющая поля дефекта по мере удаления от плоскости его симметрии вначале убывает до минимума, а затем возрастает, причем суперпозиция тангенциальных составляющих полей на одинаковом расстоянии от дефектов может достигать значительной величины и вызвать появление светлой полосы на пленке. Дальнейшее увеличение расстояния между дефектами приводит к «размыванию» между ними светлой полосы на пленке;

– индикаторные рисунки внутренних трещин имеют вид светлых извилистых рельефных линий, по обе стороны которых наблюдаются широкие темные полосы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 25225-82.** Контроль неразрушающий. Швы сварных соединений трубопроводов. Магнитографический метод. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 1982. – 13 с.
2. **Фалькевич, А. С.** Магнитографический контроль сварных соединений / А. С. Фалькевич, М. Х. Хусанов. – М. : Машиностроение, 1966. – 176 с.
3. **Новиков, В. А.** Исследование магнитографического метода контроля стыковых сварных соединений с целью повышения его разрешающей способности : дис. ... канд. техн. наук : 01.04.11 : защищена 22.03.85 : утв. 07.08.85 / Новиков Владимир Алексеевич. – Свердловск, 1985. – 204 с. – Библиогр. : с. 173–189. – 083272.
4. **Шелихов, Г. С.** Магнитопорошковая дефектоскопия деталей и узлов / Г. С. Шелихов – М. : Эксперт, 1995. – 224 с. : ил.
5. **СТБ ЕН 1290-2002.** Контроль неразрушающий сварных соединений. Магнитопорошковый метод. – Минск : Госстандарт, 2002. – 12 с.
6. **Новиков, В. А.** Исследование коэффициента отражения пленки, визуализирующей магнитные поля в области дефекта / В. А. Новиков, А. В. Шилов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2013. – № 1. – С. 88–98.

*Статья сдана в редакцию 6 января 2014 года*

**Владимир Алексеевич Новиков**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: novikovva@tut.by.

**Андрей Владимирович Шилов**, ведущий инженер, Белорусско-Российский университет.

**Vladimir Alekseyevich Novikov**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.  
E-mail: novikovva@tut.by.

**Andrei Vladimirovich Shilov**, engineer, Belarusian-Russian University.