

## КОЭРЦИТИМЕТРЫ С ПЕРЕДВИЖНЫМ (КАТЯЩИМСЯ) ДАТЧИКОМ

Безлюдько Г.Я\*., Захаров В.А.\*\*., Соломаха Р.Н.\*

\* ООО фирма "Специальные Научные Разработки", Харьков, Украина,

\*\* *Physiko-technical Institute of Academy of Sciences of Russia, Izhevsk, Russia*

Для неразрушающего контроля механических свойств, напряженно-деформированного и усталостного состояния ферромагнитных материалов широко применяются коэрцитиметры с приставным переставляемым магнитным устройством (МУ) [1, 2]. В них все стадии определения коэрцитивной силы (к.с.) выполняют при неподвижном МУ в точке контроля в течение всего цикла измерения, т.е. для измерения к.с. в другой точке датчик можно только переставлять. Недостатки такого дискретного по времени и пространству способа: ограниченное быстродействие из-за необходимости сохранять неизменным положение МУ в течение цикла измерений (около 5-10 сек); зависимость показаний прибора от соотношения размеров изделий с большой поверхностью (пластин, листов и т.п.) и «рабочей площадки» МУ; изначальная дискретность получаемого распределения величины к.с. по поверхности изделия; автоматизация процесса измерения к.с. с таким переставляемым преобразователем, несомненно сложнее.

От указанных недостатков свободны коэрцитиметры с передвижным МУ, где процесс измерения к.с. непрерывен во времени и по линии контроля [3-7]. Здесь передвижное МУ, как и существующие до сих пор переставляемые его разновидности, содержит намагничивающий элемент (НЭ) и магнитометрический блок (МБ), однако в нем эти части разнесены в пространстве так, что при перемещении по поверхности контролируемого изделия намагничивающий элемент формирует в нем полосу с остаточной намагниченностью, а расположенный за ним МБ производит непрерывный отсчет параметра, пропорционального к.с. участков намагниченной полосы.

Для намагничивания используются двухполюсные НЭ, например, на базе П-образных систем, замыкаемых контролируемым изделием. Это может быть электромагнит или устройство на базе постоянного магнита.

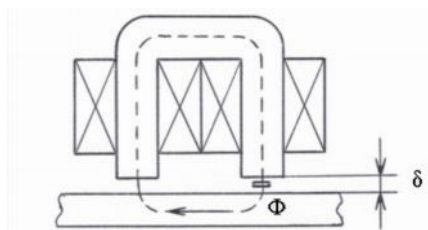


Рис. 1а

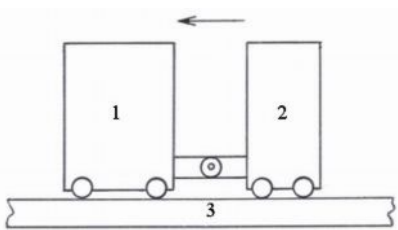


Рис. 1б

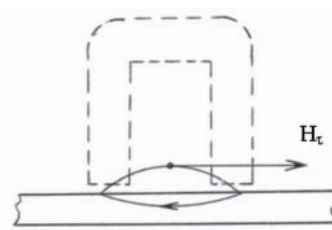


Рис. 1в

На рис.1,б схематично показано взаимное расположение указанных частей МУ (намагничивающего элемента 1 и магнитометрического блока 2, шарнирно соединенных между собой) по отношению к направлению его перемещения (показано стрелкой) по поверхности контролируемого изделия 3. Возможно также раздельное намагничивание изделия по заданному направлению с помощью элемента 1 и последующее (после удаления намагничивающего элемента) определение параметров остаточного магнитного поля над полосой контроля блоком 2.

Для того чтобы измерять параметры, пропорциональные коэрцитивной силе на предельной петле гистерезиса изделия, с помощью передвижного МУ по схеме рис.1,б, необходимо соблюдение следующих условий:

- поле остаточного намагничения изделия после прохождения намагничивающего элемента должно быть сформировано, в основном, теми объемами (трубками магнитного потока) контролируемых участков, которые намагничиваются до технического насыщения;

- топография остаточного магнитного поля изделия с одинаковой коэрцитивной силой вдоль трассы измерения должна быть неизменной по всей длине (за исключением начального и конечного участков полосы контроля, где возможны краевые эффекты).

Данные условия хорошо выполняются при использовании двухполюсных намагничивающих элементов, например, на базе разомкнутых П-образных систем, замыкаемых контролируемым изделием.

Магнитометрический блок передвижного МУ строится с учетом конфигурации остаточного магнитного поля, силовые линии которого лежат в плоскости, перпендикулярной направлению перемещения блока. При этом возможны, по крайней мере, два основных варианта отсчета параметров, пропорциональных коэрцитивной силе:

1. Традиционный метод автокомпенсации магнитного потока изделия в МУ с П-образным магнитопроводом и обмоткой размагничивания (рис.1,а) до заданного значения потока  $\Phi$  в системе, например, до нуля [8, 9]. Коэрцитивная сила в данном случае определяется по величине тока размагничивания устройства. Недостатками коэрцитиметров с системой автокомпенсации являются низкая скорость измерений, ограниченная быстродействием схемы автокомпенсации, наличие дополнительных погрешностей измерения, связанных с возможным перерегулированием в системе автокомпенсации, а также невозможность повторного измерения  $H_c$  по той же траектории движения МУ из-за изменения состояния остаточного намагничения при размагничивании во время автокомпенсации.

2. Непосредственное измерение напряженности поля над полосой контроля (рис.1,в), например, касательной (тангенциальной) составляющей этого поля  $H_t$ , близкой по значению к «внутреннему полю»  $H_i$  в изделии. Последнее, в свою очередь, при остаточном намагничении ферромагнитных тел с большой магнитной восприимчивостью на спинке петли гистерезиса, имеющих в направлении перемагничивания большой коэффициент размагничивания, практически равно коэрцитивной силе изделия на данной петле гистерезиса [10-12]. Этот метод свободен от указанного выше недостатка, связанного с электрическими преобразованиями сигналов в схемах автокомпенсации, поскольку обеспечивает быстродействие, ограниченное лишь скоростью преобразования сигнала в измерителе магнитного поля.

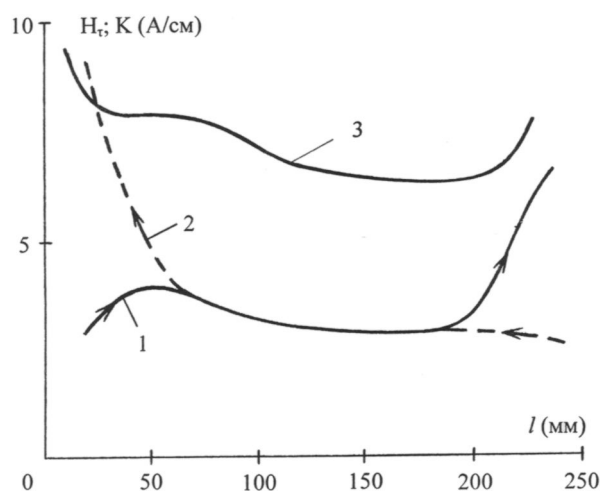


Рис. 2

В качестве примера на рис.2 показано распределение касательной составляющей напряженности магнитного поля  $H_t$  над листом из конструкционной стали (толщина листа 4

мм, размеры в плане 250×250 мм) с коэрцитивной силой 3-3,5 А/см, намагниченным передвижным П-образным электромагнитом (полюса 28×12 мм, расстояние между внутренними кромками полюсов 32 мм) вдоль средней линии листа при зазоре между полюсами электромагнита и листом  $\delta = 1,5$  мм (рис.1,а). Ток (ампервитки) намагничивания выбирался из условия технического насыщения материала листа в межполюсном пространстве электромагнита. Напряженность поля измерялась с помощью преобразователя Холла (размер активной части 0,35×0,35 мм) на расстоянии 1 мм от поверхности листа в плоскости, перпендикулярной направлению перемещения электромагнита. Кривая 1 получена при перемещении электромагнита по длине  $l$  от начальной кромки листа (слева направо), а кривая 2 (пунктир) – от конечной кромки к начальной (справа налево), как показано стрелками на рис.2. Для сравнения там же дана кривая 3 распределения по длине  $l$  показаний  $K$  (в А/см) цифрового коэрцитиметра КРМ-Ц, переставляемое МУ которого имеет сходную с указанным электромагнитом по размерам площадку контроля.

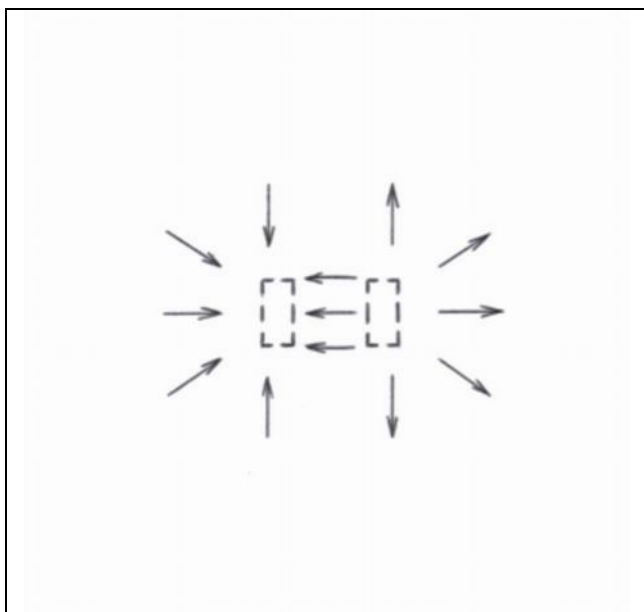


Рис. 3а

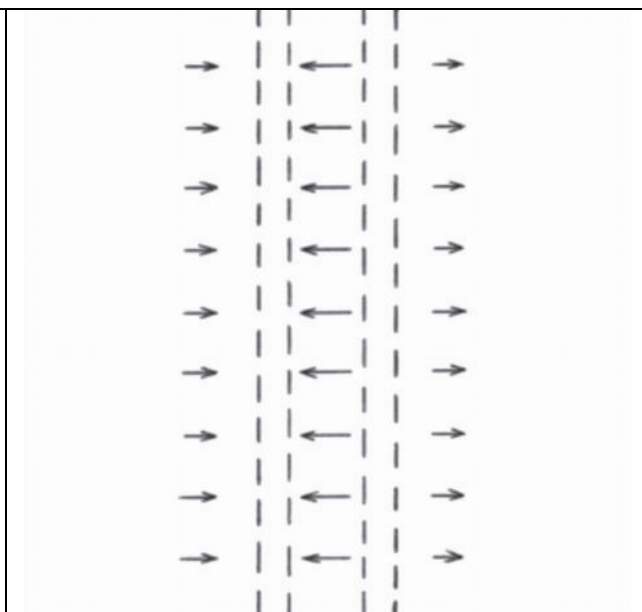


Рис. 3б

На рис.3 показана схема расположения полюсов электромагнита при «стационарном» намагничивании (рис.3,а) и при перемещении электромагнита от одного края листа к другому (рис.3,б). Стрелками на рисунках показано направление магнитных силовых линий при намагничивании.

Из рис.2 видно, что при намагничивании листового материала имеет место ярко выраженный краевой эффект. Он проявляется в том, что напряженность поля остаточного намагничивания  $H_r$  в начальной части листа оказывается меньше, а в конечной части существенно больше коэрцитивной силы  $H_c$  материала. В остальной части листа (на расстоянии 60-70 мм от начальной и конечной кромок, т.е. на участке от  $l = 60$  до  $l = 190$  мм) параметр  $H_r$  адекватно отражает распределение коэрцитивной силы изделия по длине  $l$  и близок по значению к  $H_c$ . Что касается показаний коэрцитиметра  $K$ , то они оказываются существенно (почти в два раза) выше соответствующих значений  $H_c$ . Причиной значительного увеличения  $H_r$  на конечном участке листа при намагничивании передвижным МУ и завышенных показаний коэрцитиметра при «статическом» намагничивании является следующее.

При намагничивании «стационарным» МУ (рис.3,а) магнетик намагничивается не только в контролируемой зоне (средняя часть межполюсного пространства), но и с наружной стороны, а также с двух сторон от боковых поверхностей МУ. В результате, после

намагничивания (выключения тока в электромагните) на контролируемую зону оказывают размагничивающее действие те части листа, которые расположены с наружной стороны полюсов и по бокам МУ, причем все намагниченные участки данных частей действуют согласно. Под действием этих участков магнитный поток в контролируемой зоне листа после удаления МУ меняет знак на противоположный, т.е. материал подвергается перемагничиванию по петле гистерезиса до значений «внутреннего поля», больших (по модулю) коэрцитивной силы материала.

Аналогичный процесс происходит на конечном участке листа после намагничивания его передвижным устройством (рис.3,б). Здесь на конечный участок воздействуют предыдущие намагниченные участки, в результате чего «внутреннее поле» в этом месте становится больше  $H_c$ .

Таким образом, коэрцитиметр с передвижным МУ, помимо перечисленных выше преимуществ (непрерывное измерение параметра контроля, удобство документирования результатов контроля на протяженных изделиях и изделиях с развитой поверхностью и т.д.), имеет еще одно достоинство по сравнению с традиционной схемой коэрцитиметров с МУ (по крайней мере, для изделий типа листов), а именно – возможность измерения параметра остаточного намагничивания контролируемого изделия, близкого по значению коэрцитивной силе материала и не зависящего от размеров изделия в плане. В данном случае появляется возможность путем введения небольшого постоянного поправочного коэффициента к значениям  $H_t$  непосредственно измерять величину коэрцитивной силы материала практически по всей траектории движения МУ по изделию.

Предлагаемые технические решения позволяют существенно расширить сферу применения коэрцитиметров с переставляемым МУ, особенно для диагностических роботов, поскольку обеспечивает непрерывное измерение коэрцитивной силы с высокой производительностью на изделиях большой протяженности (трубопроводы, рельсы, мосты, цистерны и т.п.). При этом упрощается процесс документирования результатов измерений, их привязка (по ходу перемещения устройства) к тем или иным участкам контролируемого изделия, построение топографии распределения значений коэрцитивной силы по поверхности изделия. Кроме того, использование в качестве намагничивающего элемента устройства постоянных магнитов может обеспечить заметное снижение энергопотребления аппаратуры, позволяет изготавливать коэрцитиметры с автономным питанием, что дополнительно расширяет функциональные возможности устройства за счет доступа к объектам, удаленным от промышленного энергоснабжения.

Подробнее на нашем сайте [www.snr-ndt.com](http://www.snr-ndt.com).

#### Литература

1. Михеев М.Н. Магнитный метод контроля твердости и микроструктуры стальных труб. – Заводская лаборатория, 1938, №10, с.1155-1160.
2. Горкунов Э.С., Захаров В.А. Коэрцитиметры с приставными магнитными устройствами (обзор). – Дефектоскопия, 1995, №8, с.69-88.
3. Томилов Г.С. Авт. свид. № 213077, Бюлл. изобр., 1968, №10, с.37.
4. Большаков В.Н., Горбаш В.Г. Способ измерения импульсных механических напряжений. Авт. свид. СССР № 1081444. – Бюл. изобр., 1984, №11.
5. Безлюдько Г.Я., Захаров В.А. Приставное устройство коэрцитиметра. Патент на изобретение РФ № 2327180, зарегистр. в госреестре изобретений РФ 20.06.2006 г.
6. Захаров В.А., Безлюдько Г.Я., Мужижкий В.Ф. Коэрцитиметры с передвижным магнитным устройством. – Контроль. Диагностика, 2008, № 1, с.6-8, 13-14.
7. Захаров В.А., Безлюдько Г.Я., Мужижкий В.Ф. Магнитное поле ферромагнитных изделий после намагничивания двухполюсным магнитом. – Контроль. Диагностика, 2008, № 2, с.33-36, 41.

8. Захаров В.А. К теории приставных магнитных устройств с магнитопроводом. – Дефектоскопия, 1978, №3, с.75-81.
9. Безлюдько Г.Я., Мужичкий В.Ф., Попов Б.Е. Магнитный контроль (по коэрцитивной силе) напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций. – Заводская лаборатория, 1999, №9, с.53-57.
10. Аркадьев В.К. Электромагнитные процессы в металлах. Ч.1. – М.-Л.: ОНТИ, 1934. – 230 с.
11. Веденев М.А., Дрожжина В.И. Об измерении коэрцитивной силы накладным датчиком. – Дефектоскопия, 1977, №5, с.65-73.
12. Захаров В.А. Магнитостатика систем с ферромагнетиками. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. – 96 с.