

КОНТРОЛЬ СТРУКТУРЫ, МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ КОЭРЦИТИМЕТРИИ

В.Ф. МАТЮК, В.Н. КУЛАГИН

Магнитный метод контроля структуры и механических свойств изделий машиностроения и металлургии широко применяется в промышленности. Контроль механических характеристик (твердости, временного сопротивления при разрыве σ_v , предела прочности σ_T , относительного удлинения δ , сужения ψ и др.) стальных изделий возможен только для материалов, для которых существует взаимосвязь этих характеристик с магнитными свойствами металла. К структурно-чувствительным магнитным характеристикам относятся: начальная и максимальная магнитные проницаемости; напряженность намагничивающего поля, соответствующего максимальной магнитной проницаемости; остаточная намагниченность; коэрцитивная сила и другие [1].

Наибольшее применение в практике неразрушающего контроля структуры и механических свойств получили остаточная намагниченность B_r и коэрцитивная сила H_c [2, 3].

Коэрцитивной силой является напряженность внешнего магнитного поля, при которой намагниченность в материале, предварительно намагниченном до насыщения, становится равной нулю. Она определяется средней величиной сил, задерживающих необратимое смещение границ между доменами при перемагничивании. Задерживать смещение границ между доменами могут неферромагнитные включения разной формы и дисперсности, напряжения, обусловленные дислокациями и другими причинами, и градиенты напряжений, границы фаз, зерен и субзерен, а также прочие неоднородности и дефекты кристаллического строения. Это обуславливает тот факт, что коэрцитивная сила является одной из наиболее структурно-чувствительных характеристик ферромагнитных материалов. Поэто-

му методы неразрушающего контроля, основанные на измерении коэрцитивной силы, нашли широкое применение. Их отличает высокая точность и достаточная простота, возможность проведения измерений на локальных участках контролируемых изделий, высокая чувствительность к фазовым превращениям, слабая зависимость от геометрических размеров объекта контроля [4].

Контроль механических свойств.

Физической основой метода контроля по коэрцитивной силе временного сопротивления при разрыве σ_v , предела прочности σ_T , относительного удлинения δ и сужения ψ является взаимосвязь между прочностью и пластичностью. Дефекты структуры повышают прочностные характеристики материала и его коэрцитивную силу, одновременно снижая пластичность.

Для холодно- и горячекатаного проката низкоуглеродистых и среднеуглеродистых сталей наблюдается надежная корреляция между коэрцитивной силой и прочностными характеристиками металла в состоянии поставки. На рис.1 в качестве примера представлены корреляционные связи механических свойств и коэрцитивной силы для горячекатаных труб общего назначения из сталей марок 10, 20, 35 и 45 [4]. Аналогичные закономерности установлены и для других марок сталей.

Метод коэрцитиметрии нашел применение и для контроля вязких свойств сталей [5].

Рассортировка сталей по маркам

Чувствительность коэрцитивной силы к содержанию углерода в стали позволяет использовать её для рассортировки углеродистых сталей по маркам. Для легированных сталей влияние легирующих элементов может нарушить корреляционную связь коэрцитивной силы с количеством углерода в стали. Несмотря на это, коэрцитиметры используются для рассортировки и таких сталей [4]. При этом рекомендуется устанавливать корреляционную связь коэрцитивной силы для марок сталей из заранее выбранных групп.

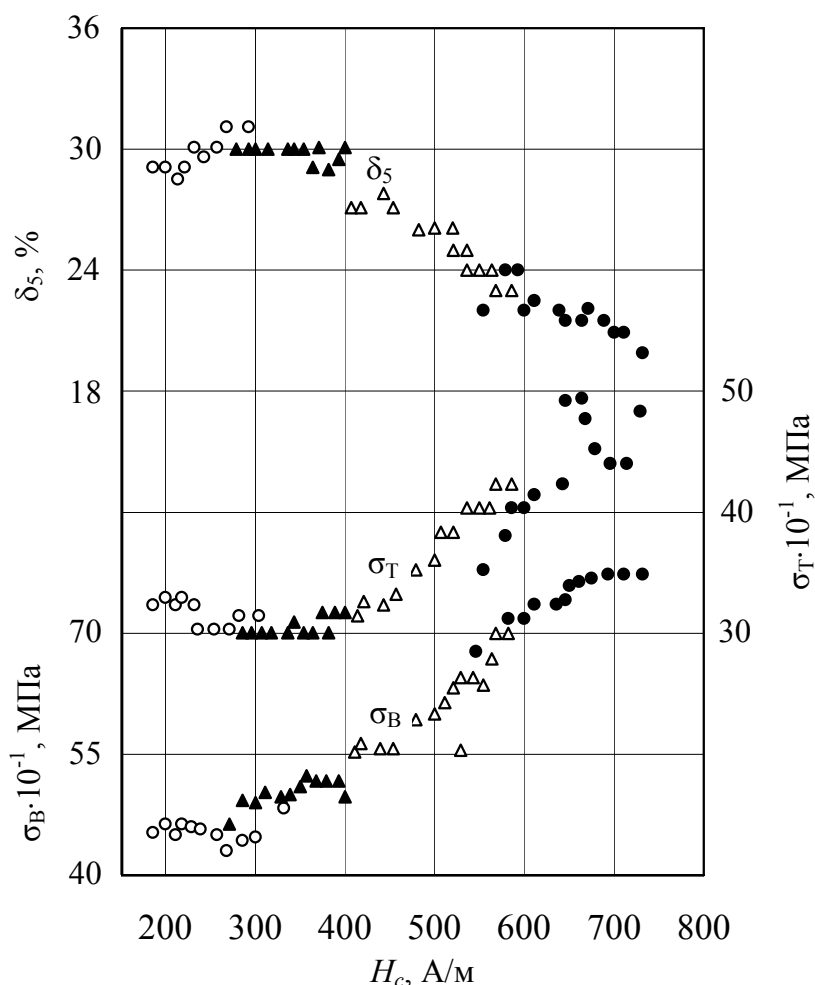


Рис. 1. Корреляция прочностных свойств и относительного удлинения сталей марок 10(○), 20 (▲), 35 (Δ) и 45 (●) с коэрцитивной силой [4].

Контроль качества отжига.

Контроль по коэрцитивной силе можно применять для контроля исходной структуры материала после отжига. В [6] сообщается об использовании этого метода на ряде подшипниковых заводов при контроле твердости и микроструктуры поковок и калиброванных прутков из сталей ШХ15 и ШХ15СГ.

По коэрцитивной силе контролируют качество отжига, смягчающего наклеп, и оценивают толщину наклепанных слоев [7].

Для определения очага загорания разработан метод, основанный на измерении коэрцитивной силы изделий из зоны пожара. Минимальная коэрцитивная сила контролируемого изделия свидетель-

ствуется о том, что оно максимальное количество времени находилось в огне [4].

Контроль качества закалки и последующего отпуска.

Коэрцитивная сила может быть использована в качестве параметра для неразрушающего контроля качества термообработки изделий из конструкционных марок сталей только после закалки или после закалки и последующего низкотемпературного отпуска, являющихся основными видами термообработок, применяемых в машиностроении. Незакаленное состояние от закаленного можно отличить по величине коэрцитивной силы для всех конструкционных сталей. При этом надежность контроля качества закалки доэвтектоидных сталей не хуже, чем при контроле по твердости [4].

Методы коэрцитиметрии успешно решают задачи контроля твердости изделий после закалки и низкотемпературного (100–300 °С) отпуска средне- и высокоуглеродистых, а также легированных марок сталей [3, 4]. Такому отпуску после закалки подвергаются измерительный и режущий инструмент, детали подшипников качения, пружины и другие детали. Однако контроль среднетемпературного и высокотемпературного отпуска закаленных деталей из конструкционных сталей невозможен из-за неоднозначности связи коэрцитивной силой с температурой отпуска в этих областях.

Контроль глубины и твердости упрочненных слоев.

Широко применяется метод коэрцитиметрии и для контроля глубины и твердости упрочненных слоев на поверхности деталей [8]. Возможность контроля глубины слоя основана на различии коэрцитивной силы поверхностного слоя и сердцевины.

Для контроля толщины поверхностно упрочненного слоя электромагнит измерительного прибора должен перемагничивать не только поверхностный слой, но и часть сердцевины изделия. Тогда изменение толщины упрочненного слоя приводит к изменению общего магнитного потока "электромагнит – контролируемое изделие" как при намагничивании, так и при перемагничивании, и, следовательно, к изменению показаний прибора.

Для контроля твердости поверхностно упрочненного слоя магнитный поток должен проникать только в поверхностный слой.

Разная глубина проникновения магнитного потока в изделие достигается использованием сердечников электромагнитов разной площади.

Контроль напряженно-деформированного состояния.

Напряженно-деформированное состояние деталей является их важной эксплуатационной характеристикой, так как при превышении определенного уровня напряжения могут привести к деформации и разрушению таких ответственных конструкций, как пролеты мостов, перекрытия зданий, стрелы и тросы подъемных механизмов и многих других, а также к заклиниванию вращающихся частей электрических машин. Значительные одноосные механические напряжения возникают и в изделиях протяженной формы при их термической обработке.

В основе контроля по коэрцитивной силе действующих в стальных конструкциях одноосных напряжений лежит магнитострикционная связь между приложенным напряжением и смещением доменных границ.

В области упругих напряжений наибольшей чувствительностью к растягивающим напряжениям обладает коэрцитивная сила, измеренная перпендикулярно к направлению приложения нагрузки. При этом с ростом растягивающих нагрузок коэрцитивная сила, измеренная в данном направлении, падает.

Напряжения сжатия вызывают наибольшие изменения коэрцитивной силы, измеренной вдоль направления приложения нагрузки. С увеличением сжимающей нагрузки коэрцитивная сила вдоль этого направления растет.

Поэтому одноосные напряжения растяжения контролируют по величине коэрцитивной силы, измеренной перпендикулярно направлению растяжения, а одноосные напряжения сжатия – по величине коэрцитивной силы, измеренной вдоль направления сжатия [9].

Коэрцитиметры

При контроле по коэрцитивной силе измеряется напряженность магнитного поля, необходимая для размагничивания предварительно намагниченного до технического насыщения изделия или локального участка изделия [10, 11].

Намагничивание и размагничивание может осуществляться как в замкнутой, так и в разомкнутой магнитной цепи медленно изменяющимся или импульсным магнитным полем.

Определение нулевого магнитного момента изделия или локальной области изделия осуществляется магнитометрическим или индукционным способом [12]. Ввиду того, что при определении коэрцитивной силы необходимо измерять малые величины магнитного момента или напряженности магнитного поля, магнитометрический способ требует применения высокочувствительных преобразователей (датчиков Холла, феррозондов). При индукционном способе измерения коэрцитивная сила определяется по нулевому уровню сигнала измерительной катушки, которая перемещается относительно контролируемого изделия, или с помощью вибрационных магнитометров.

В [13] коэрцитивная сила измеряется посредством импульсного намагничивания контролируемого участка изделия, последующего его размагничивания и определения напряженности размагничивающего поля, необходимого для снижения остаточной намагниченности до нуля. Определение нулевого значения остаточной намагниченности локального участка изделия проводится по нормальной составляющей вектора напряженности магнитного поля рассеяния.

Основными мешающими факторами при контроле по коэрцитивной силе являются изменения зазора между контролируемым изделием и преобразователем и скорость уменьшения намагничивающего тока, что требует принятия специальных мер для снижения их влияния [10].

Для реализации метода разрабатывают коэрцитиметры с преобразователями проходного типа (намагничивание и размагничива-

ние внутри соленоида) или накладного типа (намагничивание и размагничивание с помощью накладного П-образного преобразователя) с ферромагнитным сердечником.

Наиболее известным коэрцитиметром с проходным преобразователем является “Коэрцимат 1.095” фирмы “Институт д-ра Ф. Ферстера” (ФРГ). В этом приборе намагничивание контролируемого изделия осуществляется при помещении последнего внутрь соленоида. В качестве измерителей магнитного поля рассеяния от изделия использовались феррозонды, ориентированные перпендикулярно силовым линиям размагничивающего поля соленоида. Соленоид и феррозонды защищены от воздействия магнитного поля Земли и других внешних помех магнитомягким экраном. Прибор позволяет измерять коэрцитивную силу в диапазоне $1,6 - 10^5$ А/м с погрешностью не более 1 %. Однако данный прибор невозможно применять при контроле крупногабаритных изделий.

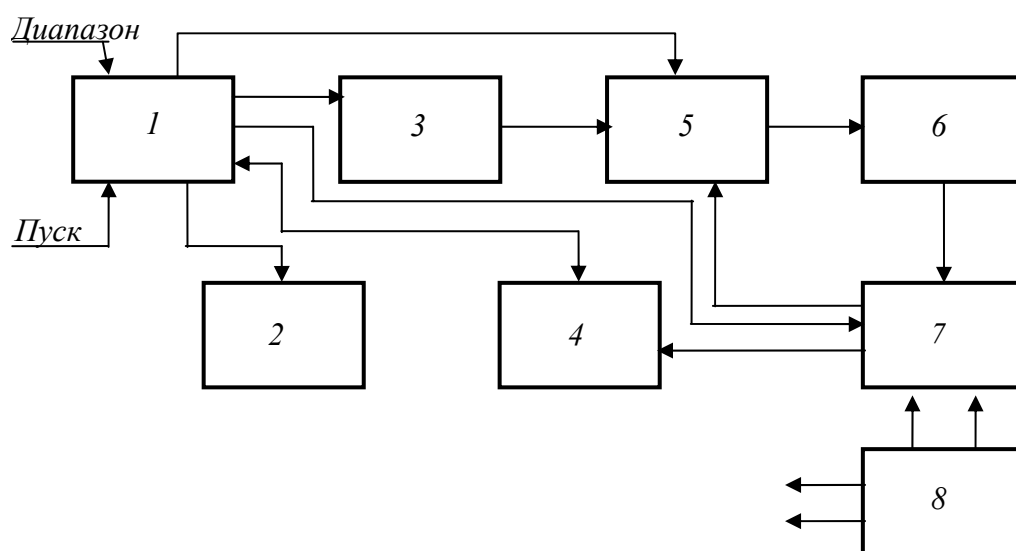
Физические основы метода и первый коэрцитиметр КИФМ с приставным электромагнитом были разработаны в Институте физики металлов Уральского отделения Академии наук России (г. Екатеринбург). Принцип действия коэрцитиметра КИФМ основан на намагничивании и перемагничивании изделия с помощью приставного П-образного электромагнита и измерении тока перемагничивания в момент равенства нулю магнитного потока. Размагниченное состояние определяется по отсутствию магнитного потока, что фиксируется рамочным феррозондом, встроенным в перемычку П-образного электромагнита.

В настоящее время имеется довольно большая номенклатура выпускаемых мелкими партиями приборов с преобразователями как проходного, так накладного типа. Поставщиками коэрцитиметров с приставным преобразователем является Институт физики металлов (г. Екатеринбург, Россия), НПФ «Специальные научные разработки» (г. Харьков, Украина) в содружестве с ЗАО «НИИН МНПО «Спектр» (г. Москва) и другие.

С целью импортозамещения и выхода на рынок стран СНГ в лаборатории магнитных методов контроля государственного научного учреждения «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси» разработана базовая модель цифрового коэрцитиметра с накладным преобразователем – коэрцитиметр Института прикладной физики (КИПФ-1) [14].

Процесс “намагничивание – перемгничивание – измерение” коэрцитиметра КИПФ-1 автоматизирован. Для устранения влияния магнитной предыстории намагничивание осуществляется импульсами разной полярности. Магнитный поток измеряется феррозондом, совмещенным с электромагнитом. Градуировка коэрцитиметра КИПФ-1 проводится по стандартным образцам с известной коэрцитивной силой, так что индикация результатов измерения осуществляется в единицах напряженности магнитного поля – А/м.

На рис. 2 изображена структурная схема коэрцитиметра КИПФ-1.



1 – блок управления, 2 – блок индикации, 3 – блок намагничивания, 4 – аналого-цифровой преобразователь, 5 – преобразователь, 6 – блок обработки сигнала, 7 – блок размагничивания, 8 – блок питания.

Рис. 2. Структурная схема коэрцитиметра КИПФ-1

Коэрцитиметр КИПФ-1 работает следующим образом. При нажатии кнопки «ПУСК» из блока 1 управления подаются соответствующие сигналы в блок 3 намагничивания и блок 7 размагничивания, блок 2 индикации и в аналого-цифровой преобразователь 4. При этом запускается блок 3 намагничивания, гаснет табло индикации результатов измерения. Блок 3 генерирует импульсы тока намагничивания, которые, проходя через обмотку приставного электромагнита, расположенного в преобразователе, намагничивают контролируемое изделие. Намагничивание осуществляется импульсами разной полярности для устранения влияния магнитной предыстории.

После прохождения импульсов намагничивания блок 1 управления подключает питание к обмотке подмагничивания феррозонда, расположенного в преобразователе 5, и отключает блок 3 намагничивания. Выходной сигнал измерительной обмотки феррозонда поступает на блок 6 обработки сигнала, где он усиливается и детектируется, а затем поступает на блок 7 размагничивания. Блок 7 размагничивания обеспечивает медленное нарастание размагничивающего тока и автоматическое поддержание величины этого тока, обеспечивающее размагниченное состояние контролируемого изделия. Сигнал, пропорциональный величине тока размагничивания, поступает на аналого-цифровой преобразователь 4 и затем через блок 1 управления на блок 2 индикации, где производится индикация результата измерения.

Общий вид коэрцитиметра КИП-1 представлен на рис. 3. Коэрцитиметр состоит из электронного блока и накладного преобразователя.

Градуировка и поверка КИПФ-1 проводятся по комплекту стандартных образцов коэрцитивной силы по намагниченности (СОКС-1), разработанных и аттестованных в Уральском научно-исследовательском институте метрологии (г. Екатеринбург). Это позволяет представлять результаты измерения непосредственно в единицах измерения H_c .



Рис. 3. Общий вид коэрцитиметра КИПФ-1

Коэрцитиметры КИПФ-1 прошли государственные приемочные испытания и внесены в государственный реестр средств измерений Республики Беларусь (№ РБ 0320176402) и России (№ 25988-034) и имеют сертификаты РБ № 2328 и России № 16443.

Замена прямых измерений механических свойств массово изготавливаемых изделий неразрушающим методом с помощью коэрцитиметра КИПФ-1 позволяет экономить металл, повысить производительность труда при контроле, гарантировать качество изделий.

Коэрцитиметры КИПФ-1 успешно эксплуатируются на ПО БелАЗ для разбраковки деталей машиностроения и на Магнитогорском и Ашинском металлургических комбинатах (Россия) для выходного контроля.

Высокий уровень научной и инженерно-технической проработки делает КИПФ-1 конкурентоспособным на рынке стран СНГ.

Производство приборов осуществляется Республиканским научно-производственным унитарным предприятием «ДИАТЕХ» по заявкам предприятий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Янус Р.И. Магнитная дефектоскопия. М. – Л.: ОГИЗ, 1946. – 171 с.
2. Мельгуй М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей. – Минск: Наука и техника, 1980. – 184 с
3. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. – М.: Наука, 1993. – 252 с.
4. Бида Г.В., Ничипурук А.П. Коэрцитиметрия в неразрушающем контроле. Дефектоскопия, 2000, № 10, с. 3–27.
5. Бида В.Г., Горкунов Э.С., Шевнин В.М. Магнитный контроль механических свойств проката. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 252 с.
6. Кузнецов И.А., Михеев М.Н. Магнитные и электрические свойства хромистых сталей в зависимости от структуры и механических свойств. – В кн.: Труды Института физики металлов. Вып. 21, Свердловск, 1959, с. 228-252.
7. Михеев М.Н., Морозова В.М., Поморцева Л.В. Магнитные и электрические свойства отожженной и деформированной стали 20. – Физика металлов и металловедение, 1963, т. XV, вып. 3, с. 343-346.
8. Кузнецов И.А. О применение коэрцитиметров при контроле толщины поверхностного закаленного слоя. – Дефектоскопия, 1979, № 2, с. 5-8
9. Захаров В.А., Боровкова М.А., Комаров В.А., Мужичкий В.Ф. Влияние внешних напряжений на коэрцитивную силу углеродистых сталей. – Дефектоскопия, 1992, № 1, с. 41-46
10. Испытания магнитных материалов и систем / Е.В. Комаров [и др.]; под ред. А.Я. Шихина. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 376 с.
11. Неразрушающий контроль: в 5-ти кн. – Кн. 3: Электромагнитный контроль: Практик. пособие / В.Г. Герасимов, А.Д. Покровский, В.В. Сухоруков; под ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высшая школа, 1992. – 312 с.
12. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева Т. 6: В 3 кн. Кн. 1: Магнитные методы контроля. / В.В. Клюев, В.Ф. Мужичкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. Кн. 2: Оптический контроль. / В.Н. Филинов, А.А. Кеткович, М.В. Филинов. Кн. 3: Радиоволновой контроль. / В.И. Матвеев. – М.: Машиностроение, 2004. – 832 с.
13. Прудвиблех И.А., Мартынюк–Лотоцкий Р.Е., Корсаков В.В. О разработке приборов для локального измерения коэрцитивной силы. – В кн.: Современные физ. методы неразрушающего контроля. – М.: МДНТП, 1984. – С. 96–98.
14. Матюк В.Ф., Мельгуй М.А., Кратиров В.Б., Делендик М.Н., Осипов А.А., Кулагин В.Н. Новый прибор для измерения коэрцитивной силы. – В кн.: Материалы международной научно-технической конференции «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов». – Могилев. 2004. – С. 122-123.