

Видно, что наибольшее расхождение между экспериментом и расчетом наблюдается для тонкостенных полых цилиндрических стержней, причем оно увеличивается с ростом их относительной длины. Для коротких стержней ($\lambda < 5$) величина коэффициента размагничивания, как сплошного, так и тонкостенного стержней, практически не зависит или слабо зависит от величины магнитной проницаемости материала. Для более длинных ($\lambda > 5$) полых цилиндрических стержней коэффициент размагничивания значительно уменьшается при $\mu < 100-150$. При $\mu > 150$ существенного влияния величины магнитной проницаемости материала стержня на значение коэффициента размагничивания не наблюдается. Такой ход зависимостей соответствует результатам работы [1] для сплошных цилиндрических стержней.

Таким образом, новое выражение для расчета коэффициента размагничивания полых цилиндрических стержней применимо в широком диапазоне изменения размеров стержня и магнитных свойств материала.

Список литературы

1. Бурцев Г.А. Расчет коэффициента размагничивания цилиндрических стержней. – Дефектоскопия, 1971, № 5, с. 20–30.
2. Матюк В.Ф., Осипов А.А. Центральный коэффициент размагничивания цилиндров. – Доклады НАН Беларуси, 2006, т. 50, № 1, с. 107–109.
3. Würschmidt J. Theorie des Entmagnetisierungsfaktors und der Scherung von Magnetisierungskurven. Braunschweig: Friedrich Vieweg & Sohn Akt. Ges., 1925. – 118 S.
4. Гринберг Г.К. Намагничивание цилиндров в слабых постоянных полях. Автореф. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. – Рига, 1960. – 13 с.
5. Матюк В.Ф., Осипов А.А. Установка УИМХ для измерения магнитных характеристик магнитомягких материалов и изделий. – Дефектоскопия, 2007, № 3, с. 12 – 25.

УДК 620.179.14

ПРИБОРЫ С НАКЛАДНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ДЛЯ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОМАГНИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Матюк В. Ф., Кратиров В. Б., Пиунов В. Д., Осипов А. А., Делендик М. П.

*Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Беларусь*

Создание надежных машин и механизмов в значительной степени связано с качеством используемых материалов, в частности, с их механическими свойствами и структурой. Требуемые свойства материалов могут быть обеспечены путем совершенствования технологии производства, а оперативный контроль их механических свойств без повреждения при достаточной точности и надежности может быть осуществлен неразрушающими методами. Среди них в черной металлургии и машиностроении наибольшее распространение получили магнитные методы благодаря простоте операций, высокой производительности и чувствительности к контролируемому параметру. В их основе лежит наличие корреляционных связей между магнитными свойствами и структурными параметрами или прочностными характеристиками материала.

К настоящему времени накоплен достаточно большой экспериментальный материал по установлению связей между магнитными параметрами и структурой или механическими свойствами широкого ряда сталей и сплавов. В значительной мере, этот материал обобщен в [1–3].

Поскольку режим термообработки играет решающую роль в формировании как магнитных, так и механических свойств, то исследования влияния на них температуры термообработки позволяют прогнозировать возможность контроля механических свойств магнитным методом. Такие исследования проводились сотрудниками лаборатории магнитных методов контроля Института прикладной физики НАН Беларуси. В результате этих исследований установлены взаимосвязи между магнитными и прочностными характеристиками низкоуглеродистых холоднокатаных (08кп, 08Ю, 3кп, 10кп, 15сп, 20сп, 18ЮА), среднеуглеродистых холоднокатаных (35, 45, 50), низколегированных холоднокатаных (65Г, 30ХГСА), среднеуглеродистых горячекатаных (35, 40, 45, 50), низколегированных горячекатаных (65Г, 30ХГСА, 30Т), некоторых высоколегированных и жаропрочных (Х5М, 1Х13, 12Х1МФ) сталей [2]. Показана принципиальная возможность контроля изделий из этих марок сталей по коэрцитивной силе и остаточной намагниченности. Следует отметить, что коэрцитивная сила сталей, подвергаемых отжигу, настолько мала, что находится у нижнего предела измерений коэрцитивными с накладным преобразователем. В этом случае отдается предпочтение контролю по градиенту напряженности поля остаточной намагниченности локально намагниченного участка.

Ниже сообщается о разработанных в Институте прикладной физики НАН Беларуси приборах контроля прочности ферромагнитных материалов и изделий, основанных на измерении коэрцитивной силы (КИПФ-1) и остаточной намагниченности (ИМА-4М).

Коэрцитивметр КИПФ-1

Высокая чувствительность коэрцитивной силы к изменению структуры металла и простота измерения в производственных условиях позволяет широко использовать её для решения многих задач неразрушающего контроля. Коэрцитивметры с приставными магнитами [3, 4], выпускаемые в Уральском научном центре, успешно используются при контроле твердости изделий. Для решения задачи импортозамещения в Институте прикладной физики НАН Беларуси разработан коэрцитивметр КИПФ-1. Прибор состоит из электронного блока и преобразователя, соединенных между собой электрическим кабелем. Внешний вид прибора представлен на рис. 1, а его структурная схема – на рис. 2.

Коэрцитивметр 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 блок АЦП 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 разнополярными импульсами для устранения влияния магнитной предистории.

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 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 намагничивания, поступает на блок аналого-цифрового преобразователя 4 и затем через блок 1 управления на блок 2 индикации, где производится индикация результата измерения.

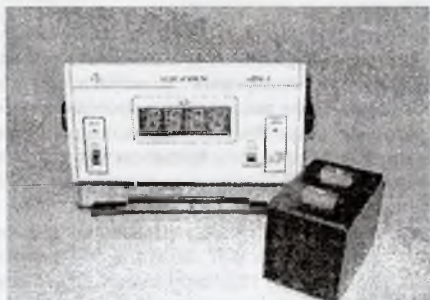


Рис. 1. Общий вид прибора КИПФ-1

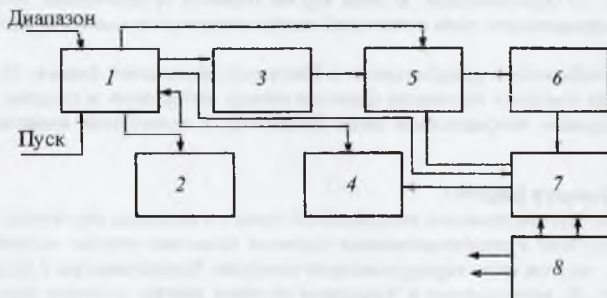


Рис. 2. Структурная схема коэрцитиметра КИПФ-1.

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

Коэрцитиметр КИПФ-1 позволяет измерять коэрцитивную силу в диапазоне 100–5000 А/м с относительной погрешностью не более 5%. Продолжительность одного измерения не более 12 с. Индикация результатов измерения цифровая. Градуировка и поверка осуществляется по набору стандартных образцов коэрцитивной силы СОКС-1. Потребляемая мощность – не более 300 ВА, габаритные размеры – 325×240×140 мм³. Масса – не более 9 кг. Прибор КИПФ-1 имеет стандартный выход для информационной связи с персональным компьютером через последовательный интерфейс RS232, что позволяет автоматизировать процесс обработки результатов измерений.

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 Магнитогорском и Ашинском металлургических комбинатах (Россия), Карагандинском металлургическом комбинате (Казахстан), ПО БелАЗ (г. Жодино).

Коэрцитиметр КИПФ-1 прошел государственные испытания, внесен в государственный реестр средств измерений Республики Беларусь под № РБ 0320176402, России – под № 25988-03 и имеет сертификаты РБ № 2328 и России № 16443.

Импульсный магнитный анализатор ИМА-4М

Импульсный магнитный метод [2, 5] контроля качества термообработки, механических свойств и структуры стального листового проката и изделий из него, основанный на измерении остаточной намагниченности, более тридцати лет применяется на промышленных предприятиях стран СНГ и за рубежом.

Метод заключается в локальном импульсном намагничивании участка контролируемого изделия соленоидом без сердечника и последующем измерении градиента напряженности поля остаточной намагниченности. Для оценки свойств металла используются корреляционные связи между измеряемым магнитным параметром и контролируемыми характеристиками (балл зерна, твердость, прочность и т.п. в соответствии с ГОСТ 30415-96).

Импульсные магнитные анализаторы ИМА-2А, ИМА-4, ИМА-4А [6-8] широко используются для неразрушающего контроля качества термообработки, механических свойств и структуры изделий из стального листового проката низкоуглеродистых и слаболегированных сталей толщиной от 0,15 мм до 4 мм.

С учетом современных требований, с использованием новых технических решений и новой элементной базы в ИПФ НАН Беларуси для замены вышеуказанных приборов разработан прибор ИМА-4М. Используемые схемотехнические решения позволили при высокой чувствительности получить хорошую повторяемость измерений и в то же время обеспечить воспроизводимость абсолютных показаний и взаимозаменяемость приборов на образцах металла в широком диапазоне изменения их свойств.

Прибор выполнен в настольном варианте и состоит из электронного блока и преобразователя, соединенных между собой электрическим кабелем.

На рис. 3 представлен внешний вид прибора.



Рис. 3. Общий вид прибора ИМА-4М.

Устройство прибора ИМА-4М поясняется электрической структурной схемой, представленной на рис. 4.

Анализатор ИМА-4М состоит из следующих функциональных узлов и блоков: генератора возбуждения 1, блока намагничивания 2, преобразователя 3, блока управления 4, измерительно-детекторного блока 5, блока аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 6 и блока питания 7.

Схема прибора выполнена на современной элементной базе, что позволило упростить устройство и, без ухудшения функциональных возможностей, снизить вес и уменьшить его габариты.

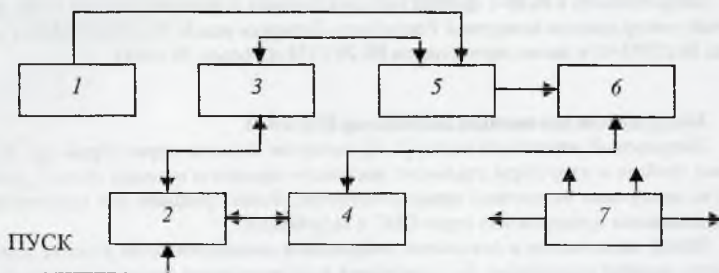


Рис. 4. Структурная схема анализатора ИМА-4М.

- 1 – генератор возбуждения; 2 – блок намагничивания; 3 – преобразователь,
4 – блок управления; 5 – измерительно-детекторный блок; 6 – блок аналого-цифрового преобразования; 7 – блок питания.

Анализатор ИМА-4М работает следующим образом. При нажатии кнопки ПУСК из блока 4 управления подаются соответствующие сигналы в блок 2 намагничивания и аналого-цифровой преобразователь 6 (АЦП). При этом запускается блок 2 намагничивания, блокируется АЦП 6, гаснет табло индикации результатов измерения и включается блок намагничивания, на табло индицируется "Н". Блок 2 намагничивания генерирует импульсы тока (серия из 10 импульсов), которые, проходя через намагничивающий соленоид, расположенный в преобразователе 3, создают импульсное магнитное поле, намагничивающее контролируемое изделие. По прохождении 10 импульсов намагничивание завершается, и блок 4 управления устанавливается в исходное состояние, что приводит к выключению блока 2 намагничивания, разблокированию АЦП. После этого производится индикация результата измерения, то есть величины сигнала, поступающего из измерительной обмотки феррозонда преобразователя 3 через измерительно-детекторный блок 5 в блок АЦП 6. Величина этого сигнала пропорциональна градиенту напряженности поля остаточной намагниченности, действующего на феррозонд преобразователя 3, который питается напряжением треугольной формы частотой 5 кГц, вырабатываемым генератором возбуждения 1.

Генератор возбуждения 1 предназначен также для выработки прямоугольного напряжения частотой 10 кГц, необходимого для управления синхронным детектором измерительно-детекторного блока.

Измерительно-детекторный блок 5 совместно с феррозондом-градиентометром преобразователя предназначен для измерения нормальной составляющей градиента напряженности магнитного поля.

Аналоговый сигнал с измерительно-детекторного блока 5 поступает на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 6. Управление работой аналого-цифрового преобразователя и прием цифрового кода, соответствующего аналоговому сигналу измерительно-детекторного блока, осуществляется контроллером блока управления 4.

Результат измерения после обработки контроллером поступает на схему индикации для отображения на цифровом индикаторе.

Контроллер блока управления 4 обеспечивает выдачу данных в персональный компьютер по последовательному каналу. Прямомпередатчик интерфейса служит для

согласования логических уровней контроллера и сигналов интерфейса стандарта RS232.

Блок питания 7 преобразует переменное напряжение питания сети 220 В в постоянное, обеспечивая схему анализатора ИМА-4М уровнями напряжения +5 В, +15 В и -15 В.

Блок намагничивания 2 совместно с блоком управления 4 и преобразователем 3 обеспечивает намагничивание ферромагнитного объекта полем намагничивающего соленоида преобразователя.

Преобразователь конструктивно выполнен в виде выносного блока и состоит из намагничивающей катушки и феррозонда-градиентометра, расположенного на оси намагничивающей катушки в области ее однородного поля. Он служит для создания импульсного магнитного поля и преобразования градиента напряженности поля остаточной намагниченности в переменное напряжение, вторая гармоника которого пропорциональна измеряемому градиенту. В новой модели прибора применена методика регулировки расположения феррозонда в преобразователе, позволяющая улучшить взаимозаменяемость преобразователей.

Импульсный магнитный анализатор ИМА-4М предназначен для магнитного контроля качества термообработки, механических свойств и микроструктуры изделий из низкоуглеродистых, а также ряда среднеуглеродистых и низколегированных холоднокатаных и горячекатаных сталей.

Для низкоуглеродистых холоднокатаных отожженных сталей прибор обеспечивает контроль: твердости от 30 до 100 единиц по шкале $HRB_{30/100}$, предела текучести σ_T от 20 до 75 кгс/мм², предела прочности σ_B от 20 до 85 кгс/мм², относительного удлинения δ_{10} от 2 до 50, а также контроль глубины лунки по Эриксену, среднего размера зерна феррита, балла зерна феррита и цемента.

Толщина контролируемых изделий - 0,15-4,0 мм; диапазон измерения градиента напряженности магнитного поля ∇H_r - $200 \pm 2 \cdot 10^4$ А/м²; погрешность измерения ∇H_r - 5%; погрешность из-за изменения зазора - не более 1,5% на каждые 0,1 мм; амплитуда намагничивающих импульсов - $2,1 \cdot 10^5$ А/м; время контрольной операции (намагничивание - измерение) - не более 10 с; диаметр контактной площадки преобразователя - 18 мм; зона влияния краевого эффекта - 100 мм.

Условия эксплуатации анализатора ИМА-4М: температура окружающей среды от плюс 5 до плюс 40 °С, максимальная влажность воздуха до 75% при температуре до 30 °С. Питание анализатора ИМА-4М осуществляется от однофазной сети переменного тока напряжением (220 ± 22) В частотой (50 ± 1) Гц. Габаритные размеры - 320х320х100 мм³; масса - не более 7 кг.

Прибор имеет цифровую индикацию результатов измерения, возможность фиксации результатов испытания после окончания цикла намагничивание - измерение и выход для информационной связи с персональным компьютером в коде КОИ-8 по ГОСТ 19768-74 (через последовательный интерфейс RS232).

Отсутствие непосредственного магнитного контакта с поверхностью контролируемого изделия обеспечивает независимость показаний прибора от наличия тонкого слоя грязи, краски или окалины на испытуемом металле.

Анализатор ИМА-4М прошел государственные испытания и зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений Республики Беларусь под № РБ 03 14 1018 99, России - под № 19948-00 и имеет сертификаты РБ № 1094 и России № 8535.

Метрологическое обеспечение осуществляется с помощью меры градиента магнитного поля типа МП1 и не требует использования стандартных образцов металла. Методика поверки прибора МП МИ785.2000 утверждена в установленном порядке.

Приборы ИМА-4М в настоящее время используются для контроля качества тонколистового проката сталей на Магнитогорском металлургическом комбинате и предприятиях "Северсталь" (г. Череповец), ЕКО Stahl (г. Айзенхюттенштадт, Германия).

Список литературы

1. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. – М.: Наука, 1993. – 252 с.
2. Мельгуй М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей. – Минск: Наука и техника, 1980. – 184 с.
3. Щербинин В.Е., Горкунов Э.С. Магнитный контроль качества металлов. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – 266 с.
4. Радилов С.В., Воробьев Е.И. Усовершенствованная схема коэрцитиметра типа КИФМ-1. – Дефектоскопия, 1978, № 12, с. 94–95.
5. Матюк В.Ф. Импульсный магнитный контроль прочностных характеристик ферромагнитных изделий. – Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук, 1998, № 4, с. 114–118.
6. Мельгуй М.А. Импульсный магнитный анализатор ИМА-2А, – В сб. "Неразрушающие методы и средства контроля и их применение в промышленности", Минск: Наука и техника, 1973, с. 81–90.
7. Мельгуй М.А., Мальцев В.Л., Пиунов В.Д., Цысецкий И.А. Импульсный магнитный анализатор ИМА-4. – Дефектоскопия, 1979, № 3, с. 29–32.
8. Мельгуй М.А., Пиунов В.Д., Цукерман В.Л. Импульсный магнитный анализатор ИМА-4А. – Дефектоскопия, 1986, № 11, с. 63–67.

УДК 620.179.14

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ИХ ИЗМЕРЕНИЮ НА ИЗДЕЛИЯХ КОНЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ С ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ

Матюк В. Ф., Осипов А. А.

*Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Беларусь*

Введение

Создание новых материалов и повышение качества продукции, разработка методов и средств их неразрушающего контроля, требует дальнейшего развития методов и средств определения магнитных характеристик изделий металлургии и машиностроения. Трудности, которые возникают при этом, определяются тем, что связь между физико-механическими и магнитными параметрами изделий носит сложный характер и часто неоднозначна [1–3].

Для практических задач неразрушающего контроля наибольший интерес представляет измерение параметров петли магнитного гистерезиса в разомкнутой магнитной цепи, так как такое измерение характеризуется повышенной производительностью, что наиболее необходимо в процессе производства. Достоверность контроля можно повысить, если использовать при контроле магнитные параметры не тела, а вещества. Однако измерение параметров вещества приводит к существенному понижению его производительности в сравнении с измерениями в разомкнутой магнитной цепи.