

РАЗРАБОТКА НОВОГО ПРИБОРА ДЛЯ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ НА ОСНОВЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ГИСТЕРЕЗИСА ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИИ ИЗДЕЛИЯ

Матюк В. Ф., Мельгуй М. А.

Институт прикладной физики НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Описано явление гистерезиса нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности при локальном импульсном перемангничивании ферромагнитных изделий и использование его особенностей для контроля качества закалки и отпуска изделий из среднеуглеродистых сталей, а также толщины и твердости поверхностно-упрочненных слоев изделий, подвергшихся закалке ТВЧ. Приводятся принцип построения, устройство, назначение и технические характеристики импульсного магнитного многопараметрового анализатора ИМА-М, предназначенного для решения этих задач неразрушающего контроля.

Введение

Магнитный метод контроля механических свойств изделий из ферромагнитных сталей благодаря простоте, высокой производительности и достаточной точности широко используется на металлургических и машиностроительных предприятиях многих стран СНГ [1, 2]. Он основан на корреляции между тем или иным магнитным параметром, который используют в качестве информативного, и контролируемой механической характеристикой изделий [3].

В черной металлургии уже на протяжении четырех десятилетий для неразрушающего контроля прочностных характеристик малоуглеродистых холоднокатаных и горячекатаных, среднеуглеродистых и низколегированных горячекатаных, некоторых высоколегированных и жаропрочных сталей после рекристаллизационного отжига успешно применяются приборы, реализующие импульсный метод магнитной структуроскопии, который заключается в локальном импульсном намагничивании контролируемого изделия неоднородным полем накладного соленоида и измерении градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности, по величине которого и по заранее установленным корреляционным связям определяют механические свойства и структуру материала (твердость, предел прочности, балл зерна и т.п.) [2, 4].

Однако этот метод в своей классической реализации не пригоден для контроля механических свойств изделий из сталей, содержащих более 0,3 % углерода и подвергаемых закалке с последующим высокотемпературным отпуском (350–600 °С), в основном из-за неоднозначности корреляционных связей. Для решения подобных задач необходимо установить информативные параметры, которые можно измерить при новых режимах намагничивания и перемангничивания контролируемого изделия.

В качестве таких информативных параметров могут быть использованы параметры гистерезиса напряженности поля остаточной намагниченности H_r и его градиента ∇H_r при локальном намагничивании и перемангничивании изделия импульсами магнитного поля изменяющейся амплитуды и поляриности [5].

Основная часть

Гистерезис градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности

Гистерезис градиента ∇H_m нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности ферромагнитного изделия наблюдается при его локальном намагничивании пятью сериями импульсов магнитного поля, амплитуда H_n которых изменяется с шагом

$\Delta H_{и}$, причем в 1-й, 3-й и 5-й сериях амплитуда импульсов увеличивается от нуля до $H_{ис}$, а во 2-й и 4-й – уменьшается от $H_{ис}$ до нуля, в 1-й, 2-й и 5-й сериях импульсы магнитного поля

имеют одну полярность, а в 3-й и 4-й – противоположную (рисунок 1). Изменение градиента $\nabla H_{гн}$ после окончания каждого из импульсов представлено на рисунке 2.

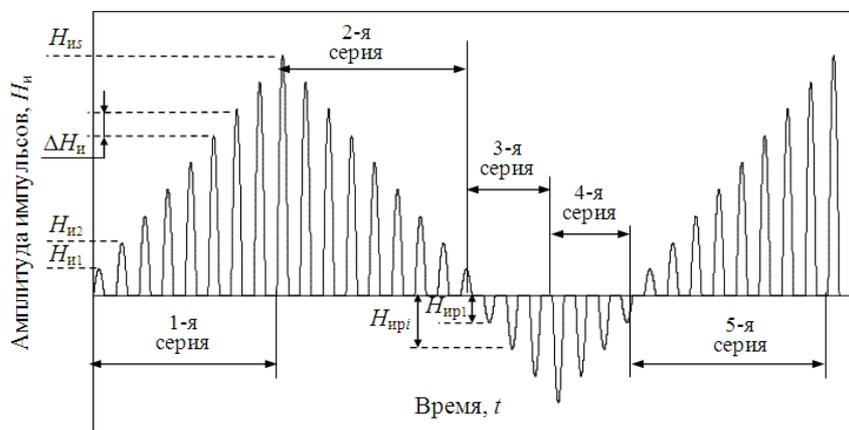


Рисунок 1 – Последовательность намагничивающих импульсов в сериях

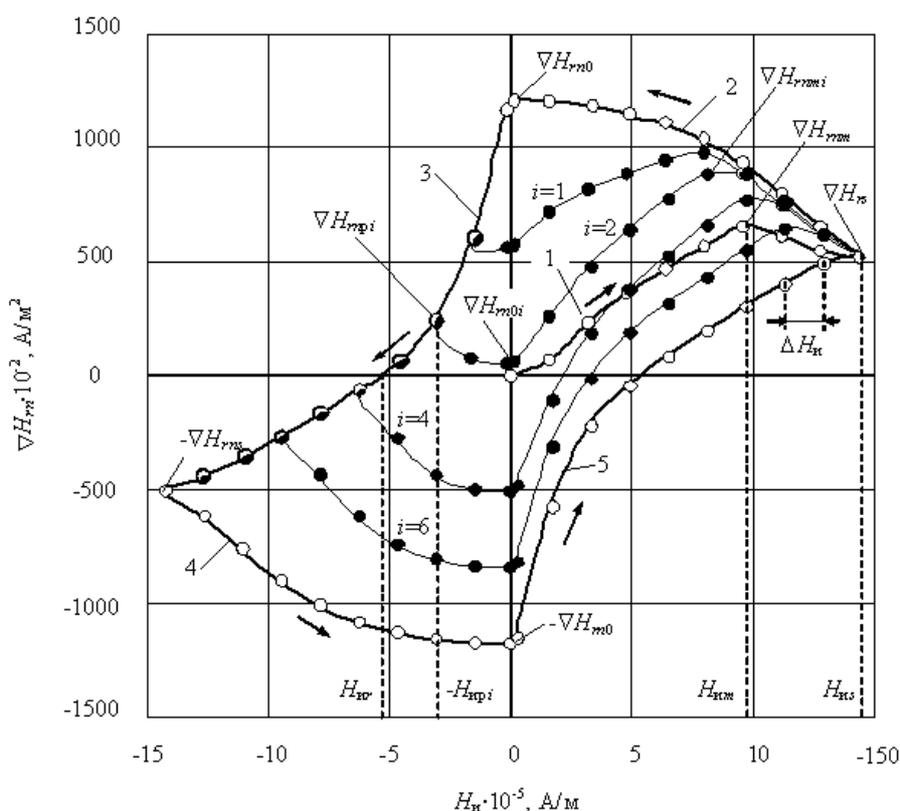


Рисунок 2 – Кривая намагничивания (1), петля гистерезиса (2–5) и кривые возврата ($i = 1, 2, 4, 6$) градиента напряженности поля остаточной намагниченности в процессе намагничивания и перенамагничивания изделия импульсами магнитного поля изменяющейся амплитуды и полярности; намагничивание импульсами: 1 – с возрастающей амплитудой; 2 – с убывающей амплитудой; 3 – с возрастающей амплитудой и измененной полярностью; 4 – с убывающей амплитудой и измененной полярностью; 5 – с возрастающей амплитудой

При локальном намагничивании предварительно размагниченного ферромагнитного изделия импульсами возрастающей амплитуды (1-я серия импульсов) градиент ∇H_{rn} (кривая 1 на рисунке 2), измеренный в центре намагниченного участка, сначала увеличивается от импульса к импульсу, достигает максимума ∇H_{rnm} при $H_n = H_{im}$, а затем уменьшается до ∇H_{rms} при $H_n = H_{is}$, то есть наблюдается неоднозначная зависимость измеряемого градиента от амплитуды намагничивающих импульсов. Аналогичным образом ведет себя и напряженность H_{rn} нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности. В то же время при намагничивании изделия в однородных статических магнитных полях с ростом намагничивающего поля имеет место стабилизация величины остаточной намагниченности и создаваемого ею магнитного поля (магнитное насыщение).

Воздействие на участок изделия, создающее после окончаний 1-й серии импульсов остаточное магнитное поле с градиентом ∇H_{rms} , импульсов с убывающей от импульса к импульсу амплитудой увеличивает величину ∇H_{rn} (кривая 2 на рисунке 2). При этом максимальное значение ∇H_{rn0} (H_{rn0}) наблюдается при амплитуде намагничивающих импульсов H_n , близкой к нулю. (При статическом намагничивании в однородном магнитном поле его уменьшение не изменяет величины напряженности поля остаточной намагниченности.)

Последующее изменение полярности импульсов и увеличение их амплитуды приводит сначала к уменьшению величины ∇H_{rn} до нуля, а затем к его росту в противоположной полярности до величины $-\nabla H_{rms}$ (кривая 3 на рисунке 2). При уменьшении амплитуды импульсов данной полярности до значения, близкого к нулю, градиент ∇H_{rn} возрастает по абсолютной величине и стремится к $-\nabla H_{rn0}$ (кривая 4 на рисунке 2).

Дальнейшее воздействие на намагниченный участок импульсами первоначальной полярности с увеличивающейся амплитудой приводит к замыканию петли гистерезиса градиента ∇H_{rn} по кривой 5 (рисунок 2). Закономерности изменения напряженности H_{rn} нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности аналогичны. Подобным образом ведут себя и все частные петли гистерезиса нормальной составляющей напря-

женности поля остаточной намагниченности и ее градиента.

В [5] показано, что причиной аномального вида петли гистерезиса нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности и ее градиента при локальном намагничивании изделия импульсным магнитным полем, изменяющимся по амплитуде и по направлению, является разная полярность намагничивания поверхностного и более глубоких слоев изделия вследствие влияния поля вихревых токов, возникающих в процессе действия импульса. Однако не меньший вклад в данный эффект вносит и магнитная предыстория локальной намагниченности изделия после каждого очередного импульса.

Если рост амплитуды импульсов в 3-й серии остановить на величине $H_{ip} < H_{is}$ и начать ее уменьшать до нуля, а затем поменять полярность и увеличивать до H_{is} , то наблюдаются так называемые кривые возврата (рисунок 2), закономерности изменения которых также отличаются от поведения аналогичных кривых при статическом перемагничивании изделия в однородном магнитном поле, которые представляют собой монотонно возрастающие кривые. Кривая возврата при импульсном перемагничивании ($-H_{ip} \leq H_n \leq H_{is}$) сначала изменяется по ниспадающей от величины ∇H_{rmpi} до ∇H_{rn0i} (i -я кривая на рисунке 2), затем по возрастающей от ∇H_{rn0i} до ∇H_{rmmi} и уменьшается до ∇H_{rms} при $H_n = H_{is}$, т.е. возвращается в вершину петли.

Информативные параметры основной кривой и петли гистерезиса градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности

Так как измерение градиента напряженности поля остаточной намагниченности характеризуется большей помехоустойчивостью по сравнению с измерением напряженности поля, то в качестве информативных параметров для контроля выберем характерные точки его изменения в процессе локального импульсного намагничивания изделия сериями импульсов изменяющейся амплитуды и полярности. В качестве таких параметров можно использовать:

∇H_{rnm} – максимальное значение градиента ∇H_{rn} на основной кривой (кривая 1);

∇H_{rms} – величину градиента ∇H_{rn} после окончания процесса намагничивания изделия

1-й серией импульсов с максимальной амплитудой $H_{ис}$ импульса;

∇H_{rn0} – величину градиента ∇H_{rn} после окончания намагничивания изделия 2-й серией импульсов, амплитуда которых уменьшается от $H_{ис}$ до нуля (практически до $0,01H_{ис}$);

∇H_{rpi} – значение ∇H_{rn} после размагничивания изделия i -м импульсом 3-й серии, амплитуда которого равна H_{ipi} ;

∇H_{r0i} – величину ∇H_{rn} по i -й кривой возврата после окончания размагничивания изделия импульсами 4-й серии, амплитуда которых уменьшается от H_{ipi} до нуля (практически до $0,01H_{ис}$);

∇H_{rmi} – максимальное значение ∇H_{rn} на i -й кривой возврата при намагничивании изделия 5-й серией импульсов, полярность которых соответствует полярности первоначального намагничивания, а амплитуда возрастает от нуля (практически от $0,01H_{ис}$) до $H_{ис}$.

Параметры ∇H_{rmi} , ∇H_{rns} и ∇H_{rn0} (для выбранных $H_{ис}$ и $\Delta H_{и}$) не зависят от цикла перемагничивания, определяемого величиной H_{ipi} , а параметры ∇H_{rpi} , ∇H_{r0i} , ∇H_{rmi} изменяются очень существенно (вплоть до изменения знака) при изменении H_{ipi} .

Выбор количества i импульсов в 3-й серии осуществляют после исследования зависимости всех вышеперечисленных параметров от температуры отпуска или механических свойств для конкретного типа изделия при всех циклах перемагничивания, а выбор используемых для контроля параметров – исходя из получения наибольшей величины коэффициента корреляции R и наименьшего значения среднеквадратического отклонения S_n .

Увеличение шага изменения амплитуды импульсов в 1-й серии несколько уменьшает величину измеряемого ∇H_{rn} [6], но его конечное значение (∇H_{rns}) при амплитуде импульса $H_{ис}$ остается неизменным. При последующем уменьшении $H_{и}$ первоначальной полярности с ростом шага ее изменения наблюдается уменьшение ∇H_{rn} (в том числе уменьшение ∇H_{rn0}) независимо от длительности импульсов. Аналогичная картина наблюдается и при изменении полярности импульсов.

При этом кривая с большим шагом изменения амплитуды импульсов становится более полой и растет величина $H_{вр}$ (петля гистерезиса как бы сжимается по оси ∇H_{rn} и расширяется по оси $H_{и}$). Однако при $H_{и} = -H_{ис}$ значения

∇H_{rn} для кривых, измеренные при разном шаге изменения амплитуды, совпадают и составляют $-\nabla H_{rns}$.

Структура материала не оказывает влияния на ход изменения кривых намагничивания и петель гистерезиса при разном шаге изменения намагничивающих импульсов.

Уменьшение длительности и, соответственно, увеличение крутизны спада заднего фронта импульсов уменьшает значения измеряемого градиента ∇H_{rn} на всех участках основной кривой и петли гистерезиса незначительно, однако при этом существенно увеличивается ширина петли. Так, на магнитотвердом образце из стали 45 величина ∇H_{rn} примерно в 3 раза больше, чем на магнитомягком, что подтверждает очень хорошую чувствительность этого параметра к изменению структуры изделия.

На форму петли и на величину информативных параметров при импульсном перемагничивании изделия оказывают влияние и его размеры [6]. Уменьшение размеров изделия приводит к увеличению значений ∇H_{rmi} , ∇H_{rns} и ∇H_{rn0} и уменьшению отношения $\nabla H_{rn0}/\nabla H_{rns}$, а петля гистерезиса становится значительно уже по сравнению с петлей образца больших размеров ($H_{вр}$ меньше).

Влияние толщины изделий на величину ∇H_{rn} зависит от амплитуды намагничивающих импульсов. Так, на образце из стали 45 толщиной 2,5 мм в состоянии поставки при амплитудах возрастающих импульсов в пределах $(0,4-3,2) \cdot 10^5$ А/м величина ∇H_{rn} значительно больше, чем на образце толщиной 15 мм. При амплитудах возрастающих импульсов в пределах $(5,6-9,6) \cdot 10^5$ А/м наблюдается обратная картина, а при изменении $H_{и}$ от $1,2 \cdot 10^6$ до $1,6 \cdot 10^6$ А/м градиент ∇H_{rn} вообще мало зависит от толщины образца.

Многопараметровый импульсный метод контроля

Современная электроника позволяет применять для обеспечения однозначности контроля механических свойств изделий из сталей, содержащих более 0,3 % углерода и подвергаемых закалке с последующим отпуском, многопараметровые методы контроля [7].

Исследования возможности применения параметров основной кривой и петли гистерезиса градиента нормальной составляющей

напряженности поля остаточной намагниченности для многопараметрового контроля проводились на образцах и изделиях из сталей 60С2, 50ХГФА, 35 и 45, подвергнутых разным режимам термообработки [8–11].

Поиск корреляционных связей между твердостью и вышеуказанными информативными параметрами для образцов из стали 60С2, подвергнутых низкотемпературному (100–320 °С) отпуску, показал, что по параметрам ∇H_{rnm} , ∇H_{rn0} , ∇H_{rnp2} и ∇H_{rnm2} можно весьма точно определить твердость HRC ($R = 0,99$ при $S_n = 0,03 HRC$). При этом уравнение корреляции имеет вид:

$$HRC_p = 47,0 - 5,26 \cdot 10^{-5} \nabla H_{rnm} + 3,93 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn0} - 1,77 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp2} - 3,13 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnm2}. \quad (1)$$

Для интервала температур 300–600°С (средне- и высокотемпературный отпуск) наиболее достоверным является контроль по трем параметрам, позволяющий определять твердость с коэффициентом корреляции $R = 0,98$ при $S_n = 1,4 HRC$. При этом:

$$HRC_p = 49,0 - 3,30 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp2} - 3,013 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rns} + 7,61 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp2}. \quad (2)$$

Для контроля твердости стали 60С2 во всем интервале возможных температур отпуска (100–600 °С) приходится использовать пятипараметровую корреляционную модель, при которой $R = 0,98$ при $S_n = 2,1 HRC$.

Анализатор импульсный магнитный многопараметровый ИМА-М

Для реализации многопараметрового импульсного магнитного метода контроля в Институте прикладной физики НАН Беларуси разработан анализатор импульсный магнитный многопараметровый ИМА-М [12].

Прибор предназначен для неразрушающего контроля твердости изделий машиностроения, подвергаемых закалке с последующим высокотемпературным отпуском. Он автоматически осуществляет локальное намагничивание и перемагничивание изделий сериями изменяющихся по величине и направлению импульсов

магнитного поля, создаваемого накладным преобразователем, измерение градиентов напряженности поля остаточной намагниченности в характерных точках основной кривой и петли гистерезиса по градиенту нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности и последующее их преобразование в величины твердости или других характеристик изделия по заранее установленным уравнениям множественной линейной корреляции.

Блок-схема анализатора ИМА-М представлена на рисунке 3.

Прибор содержит: **преобразователь А**, состоящий из намагничивающего соленоида 1 и соосного с ним феррозонда-градиентометра 2; **измерительный канал Б**, состоящий из усилителя 3, полосового фильтра 4, синхронного детектора 5, интегратора 6, датчика тока компенсации 7, программируемого усилителя 8; усилителя-ограничителя 9 и интегратора 10; **канал формирования импульсов тока В**, состоящий из повышающего трансформатора 11, проходного конденсатора 12, мостового выпрямителя 14, зарядного ключа 15, датчика тока заряда 18, накопительного конденсатора 19, датчика напряжения 21 и разрядного ключа 22; **а также** микроконтроллер 16; выход по порту USB 13 для связи с персональным компьютером (далее ПК); ЖКИ дисплей 17; кнопки управления 20 и источник питания 23.

При работе преобразователь А прибора устанавливаются на поверхность испытуемого изделия так, что ось соленоида 1 перпендикулярна поверхности изделия. Канал В под управлением микроконтроллера 16 формирует импульсы тока, изменяющиеся во времени по i -тому циклу (число i устанавливается на этапе исследования). Импульсы тока создаются путем медленного заряда накопительного конденсатора 19 через проходной конденсатор 12, который вместе с повышающим трансформатором 11 является ограничителем тока заряда, и быстрого разряда накопительного конденсатора 19 через разрядный ключ 22 на намагничивающий соленоид 1. Ток заряда и напряжение заряда накопительного конденсатора 19 контролируются микроконтроллером 16 посредством датчиков тока заряда и напряжения 18 и 21 соответственно. Импульсы тока, проходя через намагничивающий соленоид 1, создают импульсное магнитное поле, которое намагничивает и перемагничивает локальную область из-

делия (изделие на рисунке 3 не показано). Электрический сигнал феррозонда-градиентометра 2, амплитуда второй гармоники которого пропорциональна градиенту напряженности поля локальной остаточной намагниченности изделия, а фаза – знаку этого градиента, поступает на измерительный канал Б. Микроконтроллер 16 формирует сигнал, который,

проходя через усилитель-ограничитель 9 и интегратор 10, подается в обмотку возбуждения феррозонда-градиентометра 2. Одновременно микроконтроллер 16 формирует сигнал для управления синхронным детектором 5 канала измерения так, что он находится в фазе с сигналом второй гармоники феррозонда-градиентометра 2.

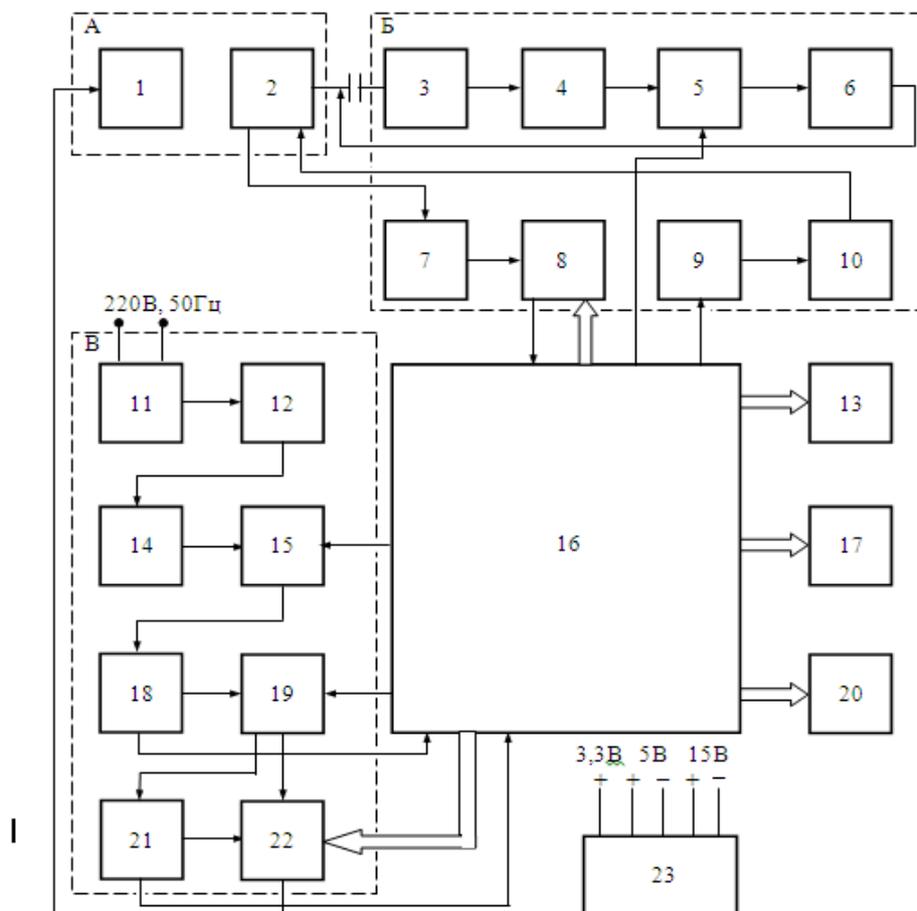


Рисунок 3 – Функциональная схема анализатора ИМА-М



Рисунок 4 – Анализатор импульсный магнитный многопараметровый ИМА-М

Выделение сигнала второй гармоники осуществляется полосовым фильтром 4. Протектированный сигнал через интегратор 6 подается в измерительную обмотку феррозонда-градиентометра 2, в полярности, обеспечивающей компенсацию измеряемого градиента поля в области феррозонда-градиентометра. Таким образом, величина компенсационного тока, протекающего через измерительную обмотку феррозонда-градиентометра, пропорциональна измеряемому градиенту поля в области расположения феррозонда-градиентометра. Ток компенсации посредством датчика 7 тока компенсации преобразуется в напряжение, величина которого через программируемый усилитель 8 измеряется микроконтроллером 16. Программируемый усилитель 8 обеспечивает масштабирование измеряемого сигнала в требуемом интервале напряжений. Под управлением микроконтроллера 16 измерительный канал осуществляет измерение сигнала, пропорционального градиенту напряженности поля локальной остаточной намагниченности изделия, после каждого импульса магнитного поля согласно i -тому циклу. Таким образом, после окончания намагничивания образца по i -тому циклу в микроконтроллере имеется массив значений градиента после каждого импульса намагничивания. По полученному массиву микроконтроллер 16 определяет значения ∇H_{rms} , ∇H_{rn0} , ∇H_{rpi} , ∇H_{rni} . Режим работы анализатора ИМА-М задается с помощью кнопок 20 управления и отображается на ЖКИ дисплее 17. Обработку информации, введенной с кнопок управления 20, и управление ЖКИ дисплеем 17 осуществляет микроконтроллер 16. Прибор имеет связь с ПК посредством USB порта 13, что позволяет передавать информацию о результатах измерения анализатором ИМА-М на ПК и управлять им с помощью ПК, используя специальную программу «ИМА-М» при наборе статистических данных. Источник питания 23 обеспечивает формирование напряжений постоянного тока, необходимых для работы устройства. Общий вид прибора представлен на рисунке 4.

Основные технические характеристики анализатора ИМА-М :

– максимальная амплитуда импульсов напряженности намагничивающего поля на

торце соленоида $H_{ис} = (5,2; 5,9; 6,5; 7,2; 7,8) \times 10^5$ А/м с погрешностью $\pm 5 \%$;

– шаг изменения амплитуды импульса $\Delta H_{и} = (1/9 H_{ис} \pm 5 \%)$ А/м; диапазон измерения градиентов ∇H_{rn} напряженности поля остаточной намагниченности $\pm (1 - 250) \cdot 10^3$ А/м²;

– относительная погрешность измерения не более $\pm 5 \%$;

– индикация результатов измерения твердости HRC или HB – цифровая;

– время одного измерения не более 30 с.

Анализатор ИМА-М успешно прошел промышленные испытания в ОАО «ТАИМ» при контроле твердости заготовок гаек колесных двух типоразмеров из стали 35 после закалки от 860 °С и после отпуска при температуре 580 °С на твердость 24–30 HRC, а также заготовок шестерен трех типоразмеров из стали 40 после закалки от 850 °С и после отпуска при 610 °С на твердость 24–30 HRC.

Прибор апробирован на этом же предприятии для контроля глубины упрочненного слоя после цементации червячного вала типа 64226-3501141 из стали 20ХНЗА и его твердости после закалки и после отпуска.

Коэффициент корреляции составил: по глубине упрочненного слоя от 0,95 до 0,99; по твердости после закалки – 0,98; после отпуска – 0,99 (при S_n соответственно 0,016 мм и 0,31 HRC и 0,86 HRC).

Заключение

Использование характерных точек на кривой изменения градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности при импульсном локальном намагничивании и перемагничивании объекта контроля импульсным магнитным полем изменяющейся амплитуды и полярности в качестве информативных параметров многопараметрового магнитного контроля позволяет решить задачу контроля механических свойств изделий из сталей, содержащих более 0,3 % углерода и подвергаемых закалке с последующим отпуском.

Разработанный для реализации импульсного многопараметрового магнитного метода прибор ИМА-М показал свою эффективность для контроля структурного состояния ответственных изделий машиностроения.

Список использованных источников

1. *Михеев, М.Н.* Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля / М.Н. Михеев, Э.С. Горкунов. – М. : Наука, 1993. – 252 с.
2. *Мельгуй, М.А.* Магнитный контроль механических свойств сталей / М.А. Мельгуй. – Минск : Наука и техника, 1980. – 184 с.
3. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры металлопродукции магнитным методом: ГОСТ 30415–96. – Введ. 01.01.1998. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. – 16 с.
4. *Матюк, В.Ф.* Приборы для контроля механических свойств ферромагнитных изделий импульсным магнитным методом с накладными преобразователями / В.Ф. Матюк // Приборы и методы измерений. – 2010. – № 1. – С. 29–36.
5. *Мельгуй, М.А.* Аномальный гистерезис поля остаточной намагниченности и его градиента при намагничивании ферромагнетика импульсным магнитным полем / М.А. Мельгуй, В.Б. Кратиров. // Дефектоскопия. – 1986. – № 12. – С. 64–70.
6. *Матюк, В.Ф.* Контроль прочностных характеристик и качества термообработки ферромагнитных изделий по параметрам петли гистерезиса остаточной намагниченности при их локальном намагничивании и перемагничивании импульсным магнитным полем изменяющейся амплитуды. I. Параметры петли гистерезиса / В.Ф. Матюк [и др.] // Дефектоскопия. – 2005. – № 5. – С. 3–13.
7. *Бида, Г.В.* Многопараметровые методы в магнитной структуроскопии и неразрушающем контроле механических свойств сталей / Г.В. Бида, А.П. Ничипурук // Дефектоскопия. – 2007. – № 8. – С. 3–24.
8. *Матюк, В.Ф.* О возможности контроля механических свойств стали 50ХГФА импульсным магнитным методом / В.Ф. Матюк [и др.] // Дефектоскопия. – 2003. – № 9. – С. 28–36.
9. *Матюк, В.Ф.* Исследование возможности магнитного контроля механических свойств рессорно-пружинной стали 60С2 / В.Ф. Матюк [и др.] // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2004. – № 1. – С. 112–120.
10. *Матюк, В.Ф.* Новые возможности импульсного магнитного метода контроля твердости изделий из ферромагнитных сталей / В.Ф. Матюк [и др.] // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2006. – № 2. – С. 114–120.
11. *Матюк, В.Ф.* Контроль качества высокотемпературного отпуска изделий из среднеуглеродистой качественной стали 45 многопараметровым импульсным магнитным методом / В.Ф. Матюк [и др.] // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2006. – № 3. – С. 113–118.
12. *Матюк, В.Ф.* Прибор для импульсного магнитного многопараметрового контроля твердости изделий машиностроения после их закалки и отпуска / В.Ф. Матюк, М.А. Мельгуй, Д.А. Пинчуков // Химическая техника. – 2007. – № 7. – С. 22–23.

Matyuk V. F., Melgui M. A.

Design of the new device for the magnetic structurescopy using features of the residual magnetization hysteresis during article pulsed reversal magnetizing

The hysteresis effect of the normal component of the residual magnetization field strength during local pulsed reversal magnetizing of ferromagnetic articles and using its features for quality testing of medium-carbon steel articles hardening and tempering, articles surface-hardened layer thickness and hardness after induction hardening are presented. Design principles, structure, purposes and technical characteristics of the pulsed magnetic multiparameter analyzer IMA-M for set forth above problems of the non-destructive testing are given.

Поступила в редакцию 25.02.2011.