

**ПРИБОРЫ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ
НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО
ИМПУЛЬСНОГО ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ**
*Instruments of magnetic structurescopy based on the local
cyclic pulse magnetization*

Матюк В.Ф.
Matyuk V.F.

Описан принцип работы, устройство, назначение и технические характеристики приборов, реализующих импульсный метод магнитной структуроскопии с использованием локального циклического перемагничивания. Рассмотрены особенности построения и работы приборов типа КИМ-1 и ИМА-М. Показаны возможности и ограничения импульсного многопараметрового контроля.

The principle of operation, the structure, the purpose and technical characteristics of instruments implementing the pulsed method of magnetic structurescopy using local cyclic magnetization are given. The design and operation features of KIM-1 and IMA-M type instruments are discussed. The capabilities and limitations of pulse multiparametric testing are shown.

Введение

Приборы, измеряющие градиент нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности после локального импульсного однополярного намагничивания или после локального импульсного намагничивания и частичного размагничивания, позволяют решить широкий круг задач магнитной структуроскопии: контроль качества термообработки, механических свойств и структуры изделий из низкоуглеродистых и слаболегированных сталей толщиной от 0,15 до 30 мм после технологического отжига; контроль структурного состояния изделий машиностроения из конструкционных среднеуглеродистых марок сталей, подвергнутых низкотемпературному, среднетемпературному или высокотемпературному отпуску после закалки; сортировка сталей по маркам и контроль уровня остаточной намагниченности изделий [1–3].

Однако, если структурные изменения металла в процессе технологической обработки таковы, что одно из таких изменений сопровождается рядом сопутствующих, однопараметровый контроль становится не-

возможным или неэффективным [4]. В ряде случаев данная задача решается измерением нескольких магнитных параметров.

Многопараметровые методы должны использовать минимальное для обеспечения достоверности контроля количество легко измеряемых магнитных параметров. При этом целесообразно, чтобы между используемыми параметрами отсутствовала корреляционная связь, либо она была минимальной [5, 6].

Двухпараметровый контроль по сумме градиентов нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности, измеренных после намагничивания и после частичного размагничивания изделия импульсом, полностью размагничивающим изделие, отпущенное при минимально возможной температуре, реализованный в приборах ИМА-6, не только устраняет неоднозначность, но и повышает чувствительность контроля качества закалки и отпуска изделий из конструкционных среднеуглеродистых сталей [3].

Усложнение задач магнитной структуроскопии, например контроль неоднородности структуры металла по глубине, требует использования новых параметров, несущих информацию об изменении магнитного состояния металла на разных стадиях намагничивания и перемагничивания изделия.

В качестве таких информативных параметров могут быть использованы характерные точки на кривых изменения напряженности поля остаточной намагниченности H_r и ее градиента ∇H_r при локальном циклическом намагничивании и перемагничивании изделия сериями импульсов магнитного поля с изменяющейся амплитудой и полярностью [7].

ПОВЕДЕНИЕ ПОЛЯ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ И ЕГО ГРАДИЕНТА ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ ИМПУЛЬСНОМ НАМАГНИЧИВАНИИ И ПЕРЕМАГНИЧИВАНИИ

Важной характеристикой ферромагнитных материалов является петля магнитного гистерезиса, представляющая собой зависимость намагниченности M или магнитной индукции B от напряженности внешнего магнитного поля H , изменяющегося по циклу $+H_m, 0, -H_m, 0, +H_m$ (рис. 1, а). В случае, когда величина H_m достаточно велика ($H_m = H_s$), дальнейшее увеличение внешнего магнитного поля не меняет формы петли и петля называется предельной. При $H_m < H_s$ петли называются частными и располагаются внутри предельной [8].

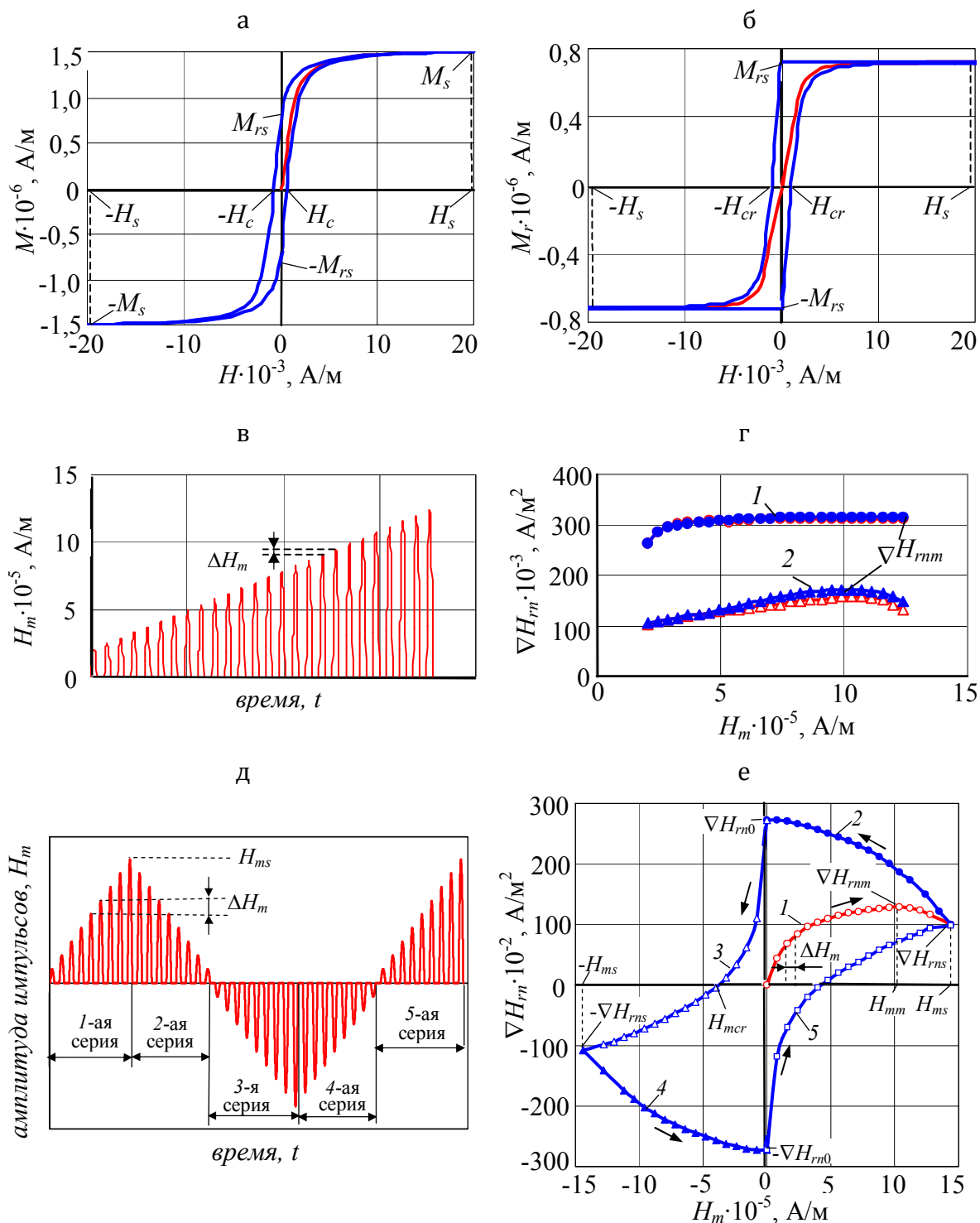
Основными характеристиками предельной петли магнитного гистерезиса являются намагниченность M_s (магнитная индукция B_s) насыщения, остаточная намагниченность M_r (остаточная магнитная индукция B_r) и коэрцитивная сила H_c .

Циклическое перемагничивание ферромагнетика сопровождается также и гистерезисом остаточной намагниченности, но петля гистерезиса по остаточной намагниченности несколько отличается от петли магнитного гистерезиса по намагниченности [9].

При циклическом перемагничивании ферромагнетика однородным полем в замкнутой магнитной цепи его остаточная намагниченность M_r возрастает с увеличением максимальной амплитуды цикла и стремится к остаточной намагниченности M_{rs} по предельной петле гистерезиса. Основное отличие петли гистерезиса по остаточной намагниченности состоит в том, что после достижения своего максимального значения M_{rs} последующее уменьшение напряженности внешнего магнитного поля от H_s до нуля не изменяет величину остаточной намагниченности $M_r = M_{rs}$ (рис. 1, б). С изменением полярности внешнего магнитного поля и ростом его абсолютной величины до H_{cr} (релаксационная коэрцитивная сила) величина M_r уменьшается от M_{rs} до нуля. Дальнейшее увеличение H в данной полярности приводит к изменению полярности M_r и достижения ею величины $-M_{rs}$ (при $H = -H_s$). Уменьшение по абсолютной величине H от $-H_s$ до нуля также не изменяет значение остаточной намагниченности $M_r = -M_{rs}$. Возрастание внешнего поля от нуля в первоначальном направлении вызывает уменьшение абсолютных значений M_r до нуля (при $H = H_{cr}$), смену полярности и рост до M_{rs} (при $H = H_s$).

В отличие от циклического изменения статических намагничивающих полей, импульсное локальное намагничивание приводит к аномальным закономерностям изменения остаточной намагниченности и создаваемой этой намагниченностью поля (поля остаточной намагниченности).

Во-первых, при импульсном намагничивании наблюдается аномальное поведение остаточной намагниченности от кривой намагничивания. Так, при локальном однополярном намагничивании ферромагнитного образца серией возрастающих по амплитуде импульсов с шагом ΔH_m (рис. 1, в) наблюдается неоднозначная зависимость величины нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности H_m и ее градиента ∇H_m с ростом амплитуды импульсов H_m – после достижения максимума ∇H_{rm} величина градиента ∇H_m уменьшается с дальнейшим ростом амплитуды импульсов [10]. Данная закономерность, проявляющаяся на толстых образцах при достаточной скорости нарастания намагничивающего импульса (рис. 1, г), связывалась с усилением размагничивающего действия поля вихревых токов из-за увеличения крутизны фронтов импульсов с ростом их амплитуды [11]. В то же время с ростом однородного статического магнитного поля имеет место стабилизация величины поля остаточной намагниченности образца.



Сталь 45, состояние поставки; а, б – циклическое знакопеременное статическое перемагничивание
 в, г – импульсное однополярное намагничивание; (○, △ – размагничивание после каждого импульса
 ●, ▲ – без размагничивания, толщина образца: 1 – 2 мм, 2 – 20 мм);
 д, е – перемагничивание сериями импульсов, изменяющихся по амплитуде и по знаку;

Рис. 1. Циклы намагничивания и изменения намагнитченности, остаточной намагнитченности и градиента напряженности поля остаточной намагнитченности

Аналогичным образом ведет себя и напряженность H_{rn} нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности.

Во-вторых, при импульсном намагничивании наблюдается аномальное возрастание нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности H_{rn} и ее градиента ∇H_{rn} в центре локально намагниченного участка с последующим уменьшением амплитуды импульсов от импульса к импульсу с шагом ΔH_m при сохранении их полярности. При статическом намагничивании в однородном магнитном поле его уменьшение не изменяет величины напряженности поля остаточной намагниченности.

Наиболее наглядно аномальное поведение остаточной намагниченности и создаваемого ею магнитного поля проявляется при локальном намагничивании образца несколькими сериями импульсов, изменяющимися по амплитуде и по знаку [12].

Так, петля гистерезиса градиента ∇H_{rn} нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности замыкается при воздействии на изделие пятью сериями импульсов магнитного поля, амплитуда H_m которых изменятся с шагом ΔH_m , причем по абсолютной величине амплитуда импульсов в 1-й, 3-й и 5-й сериях увеличивается от нуля до H_{ms} , а во 2-й и 4-й – уменьшается от H_{ms} 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 (рис. 1, д). Изменение градиента ∇H_{rn} после окончания каждого из импульсов представлено на рис. 1, е.

При локальном намагничивании предварительно размагниченного изделия импульсами возрастающей амплитуды (1-ая серия импульсов) градиент ∇H_{rn} (кривая 1 на рис. 1, е), измеренный в центре намагниченного участка, сначала увеличивается от импульса к импульсу, достигает максимума ∇H_{rnm} при $H_m = H_{mm}$, а затем уменьшается до ∇H_{rns} при $H_m = H_{ms}$, 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.

Воздействие на намагниченный участок изделия, сохраняющий после намагничивания 1-ой серией остаточное магнитное поле с градиентом ∇H_{rns} , импульсов с убывающей от импульса к импульсу амплитудой увеличивает величину ∇H_{rn} (кривая 2 на рис. 1, е). При этом максимальное значение ∇H_{rn0} (H_{rn0}) наблюдается при амплитуде намагничивающих импульсов $H_m = \Delta H_m$.

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 $-\nabla H_{rns}$

(кривая 3 на рис. 1, е). Амплитуду импульсов H_{mcr} , при которой достигается нулевое значение нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности или ее градиента, будем называть релаксационной коэрцитивной силой в импульсном режиме перемагничивания.

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 рис. 1, е). Дальнейшее воздействие на намагниченный участок импульсами первоначальной полярности с увеличивающейся амплитудой приводит к замыканию петли гистерезиса градиента ∇H_{rn} по кривой 5 (рис. 1, е). Закономерности изменения нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности H_{rn} аналогичны. Подобным образом ведут себя и все частные петли гистерезиса нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности и ее градиента.

В [7] 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. Разную полярность намагничивания этих слоев авторы объясняли влиянием поля вихревых токов, возникающих в процессе действия импульса магнитного поля.

Однако не меньший вклад в данный эффект вносит и магнитная предыстория локальной намагниченности изделия после каждого очередного импульса. Об этом говорит тот факт, что если после каждого импульса в серии проводить размагничивание, то эффект уменьшения остаточной намагниченности с ростом амплитуды импульсов хотя и остается, но несколько ослабевает, а гистерезис остаточной намагниченности вообще пропадает.

В [13] показано, что ферромагнетик, находящийся в остаточной намагниченном состоянии, под действием переменного магнитного поля с амплитудой, плавно убывающей до нуля, в некоторых случаях не только не размагничивается, но может увеличить свою остаточную намагниченность и даже изменить полярность.

Для оценки влияния вихревых токов, возникающих в проводящем ферромагнетике в процессе импульсного намагничивания, на изменение ∇H_{rn} были сняты петли на тонком диске с разрезом по диаметру. Для намагничивания использовались импульсы с разной длительностью заднего фронта, что достигалось подключением к разрядной цепи демпфирующего диода.

Результаты, представленные на рис. 2, показывают, что даже при

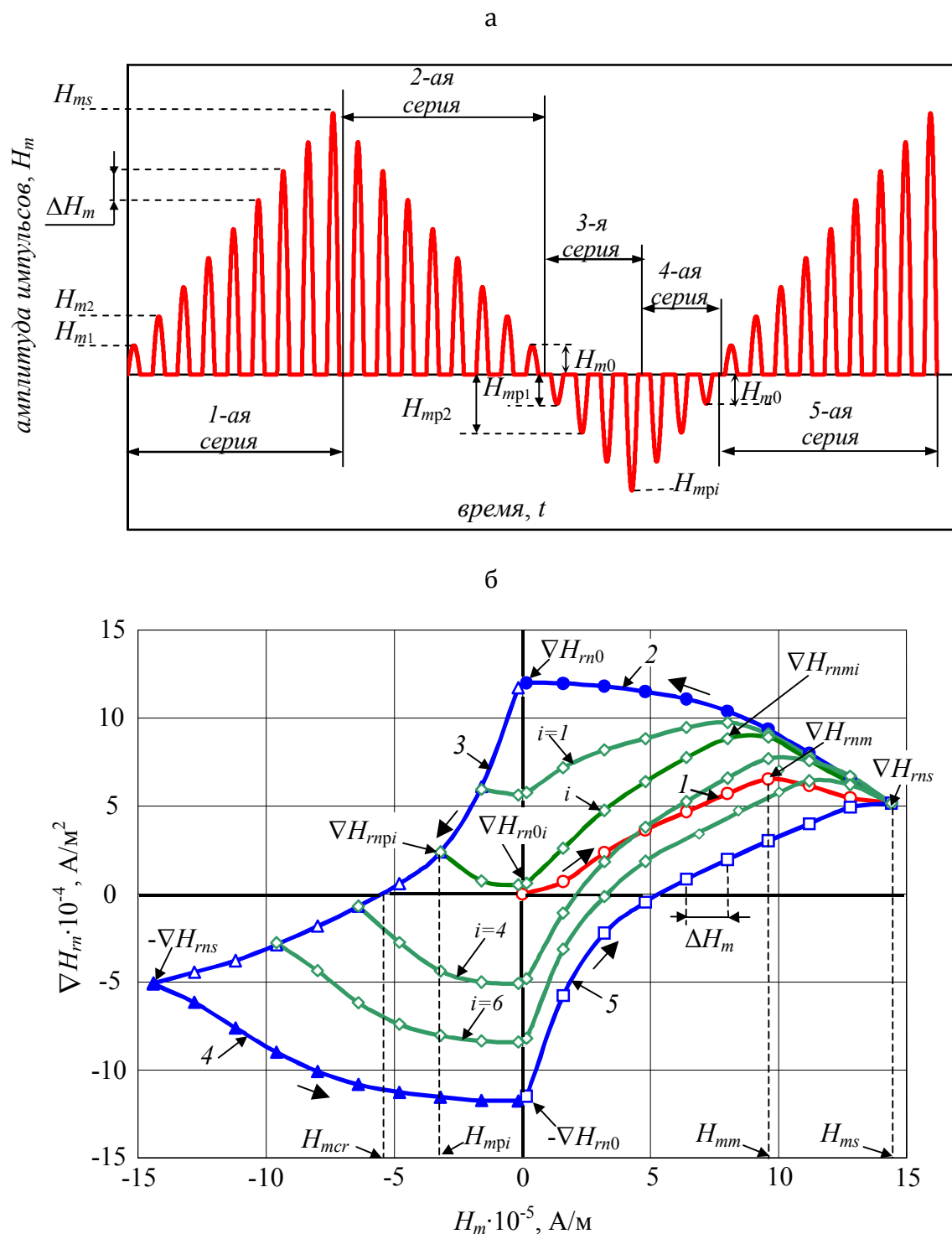


Рис. 3. Диаграмма изменений амплитуды импульсов (а), петля гистерезиса и кривые возврата градиента напряженности поля остаточной намагниченности (б)

Если рост амплитуды импульсов в 3-ей серии остановить на величине $H_{mp} < H_{ms}$ и начать ее уменьшать до нуля, а затем поменять полярность и увеличивать до H_{ms} , то наблюдаются так называемые кривые

возврата (рис. 3). Закономерности их изменения также отличаются от аналогичных закономерностей при статическом перемагничивании изделия в однородном магнитном поле, которые представляют собой монотонно возрастающие кривые. Кривая возврата при импульсном перемагничивании ($-H_{mpi} \leq H_m \leq H_{ms}$) сначала изменяется по ниспадающей от величины ∇H_{rmpi} до ∇H_{rn0i} (i -я кривая на рисунке 3), затем по возрастающей от ∇H_{rn0i} до ∇H_{rnm} и уменьшается до ∇H_{rns} при $H_m = H_{ms}$, то есть возвращается в вершину петли.

ИНФОРМАТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МНОГОПАРАМЕТРОВОГО ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ

Очевидно, что в качестве информативных параметров для неразрушающего контроля изделия с применением локального импульсного намагничивания сериями импульсов изменяющейся амплитуды и полярности можно выбрать характерные точки изменения величин H_{rn} или ∇H_{rn} на соответствующей петле гистерезиса. Использование градиента в качестве информативного параметра предпочтительнее, поскольку его измерение характеризуется большей помехоустойчивостью по сравнению с измерением напряженности поля. Таким образом, в качестве параметров многопараметрового импульсного контроля были выбраны:

∇H_{rnm} – максимальное значение градиента ∇H_{rn} при возрастании амплитуды импульсов в 1-ой серии (кривая 1);

∇H_{rns} – величина градиента ∇H_{rn} после окончания процесса намагничивания изделия 1-ой серией импульсов с максимальной амплитудой H_{ms} ;

∇H_{rn0} – величина градиента ∇H_{rn} после окончания намагничивания изделия 2-ой серией импульсов, амплитуда которых уменьшается от H_{ms} до ΔH_m ;

∇H_{rmpi} – значение ∇H_{rn} после размагничивания изделия i -ым импульсом 3-ей серии, амплитуда которого равна H_{mpi} ;

∇H_{rn0i} – величина ∇H_{rn} по i -той кривой возврата после окончания размагничивания изделия импульсами 4-ой серии, амплитуда которых уменьшается по абсолютной величине от H_{mpi} до ΔH_m ;

∇H_{rnm} – максимальное значение ∇H_{rn} на i -той кривой возврата при намагничивании изделия 5-ой серией импульсов, полярность которых соответствует полярности первоначального намагничивания, а амплитуда возрастает от нуля до ΔH_m .

Для выбранных значений H_{ms} и ΔH_m величины параметров ∇H_{rnm} , ∇H_{rns} и ∇H_{rn0} не зависят от номера цикла перемагничивания i (количества импульсов в 3-ей серии), определяющего величину H_{mpi} . В то же

время параметры ∇H_{rmpi} , ∇H_{rn0i} , ∇H_{rnm} при изменении номера цикла изменяются очень существенно (вплоть до изменения знака).

Выбор количества импульсов i в 3-ей серии осуществляют после исследования зависимости всех вышеперечисленных параметров от температуры отпуска или механических свойств 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 .

ВЛИЯНИЕ ШАГА ИЗМЕНЕНИЯ АМПЛИТУДЫ, ДЛИТЕЛЬНОСТИ НАМАГНИЧИВАЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ И СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКА НА ИНФОРМАТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

В [14] показано, что влияние величины шага изменения амплитуды импульсов ΔH_m на изменение ∇H_{rn} зависит от цикла перемагничивания. Так, увеличение ΔH_m в 1-ой серии импульсов несколько уменьшает величину измеряемого градиента ∇H_{rn} , но его конечное значение (∇H_{rms}) при амплитуде импульса H_{ms} остается неизменной. При последующем уменьшении амплитуды импульсов H_m в первоначальной полярности (2-ая серия импульсов) увеличение шага этого изменения приводит к уменьшению градиента ∇H_{rn} (в том числе к уменьшению ∇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 релаксационной коэрцитивной силы H_{mcr} (петля гистерезиса как бы сжимается по оси ∇H_{rn} и расширяется по оси H_m). Однако при $H_m = -H_{ms}$ значения ∇H_{rn} для кривых, измеренные при разном шаге изменения амплитуды, совпадают и составляют $-\nabla H_{rms}$.

При перемагничивании изделия сериями импульсов структура материала не оказывает влияния на ход изменения градиента ∇H_{rn} , но существенно изменяет его абсолютную величину. Так, на закаленном образце из стали 45 величина ∇H_{rn} примерно в 3 раза больше, чем на образце в состоянии поставки, что подтверждает высокую чувствительность данного параметра к изменению структуры изделия.

Уменьшение длительности импульса в серии и, соответственно, увеличение крутизны его спада уменьшает значения измеряемого градиента ∇H_{rn} на всех участках основной кривой и петли гистерезиса незначительно, однако при этом существенно увеличивается ширина петли.

Рост толщины изделия приводит к уменьшению значений ∇H_{rnm} , ∇H_{rms} и ∇H_{rn0} и увеличению отношения $\nabla H_{rn0}/\nabla H_{rms}$, а петля гистерезиса

становится значительно шире по сравнению с петлей образца меньшей толщины (H_{mcr} больше). При этом влияние толщины изделия на форму петли гистерезиса и на величину информативных параметров при циклическом импульсном перемагничивании изделия зависит от амплитуды импульса в серии. 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 (1-ая серия импульсов) величина ∇H_{rn} значительно больше, чем на образце толщиной 15 мм. При амплитудах возрастающих импульсов этой же серии в пределах $(5,6 - 9,6) \cdot 10^5$ А/м наблюдается обратная картина, а при изменении H_m от $1,2 \cdot 10^6$ до $1,6 \cdot 10^6$ А/м градиент ∇H_{rn} вообще мало зависит от толщины образца [14].

Весьма чувствительной к толщине изделий является релаксационная коэрцитивная сила H_{mcr} в импульсном режиме перемагничивания. Так, ее величина для образца из стали 45 толщиной 15 мм в 5 раз больше, чем для образца из той же стали толщиной 2,5 мм, причем чем больше шаг изменения амплитуды намагничивающих импульсов, тем больше величина H_{mcr} .

ПРИБОРЫ, РЕАЛИЗУЮЩИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЕ ИМПУЛЬСНОЕ НАМАГНИЧИВАНИЕ И ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕ

Импульсный магнитный структуроскоп КИМ-1

В импульсном магнитном структуроскопе КИМ-1 реализован неполный гистерезисный цикл градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности ∇H_{rn} [15], когда на изделие воздействуют только двумя сериями импульсов одной полярности, сначала возрастающих, а затем убывающих по амплитуде. После этого воздействия проводится измерение градиента ∇H_{rn} .

На рис. 4 представлена функциональная схема, преобразователь и общий вид прибора КИМ-1.

Его отличительной особенностью является наличие автоматического и ручного выбора числа импульсов в серии.

В автоматическом режиме прибор КИМ-1 работает следующим образом. При нажатии кнопки ПУСК, расположенной в преобразователе 2, блок намагничивания 7 формирует импульс тока, который, проходя через соленоид 2-2 преобразователя (внешний диаметр 45 мм, внутренний диаметр 8 мм, длина 32 мм) создает импульс магнитного поля с амплитудой ΔH_m . Этот импульс локально намагничивает изделие. На время формирования намагничивающего импульса блок управления 8 блокирует аналого-цифровой преобразователь 4 и блок индикации 6.

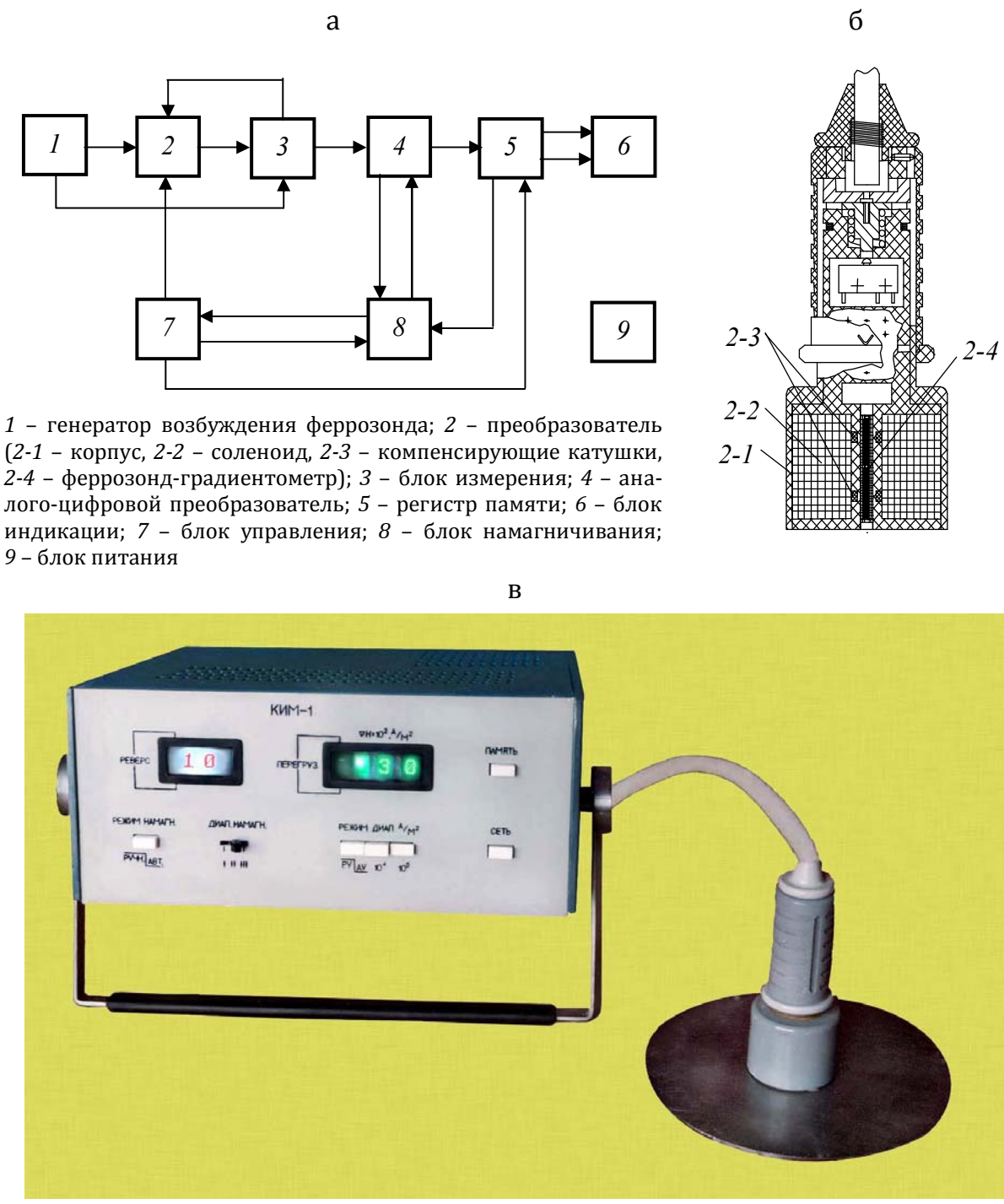


Рис. 4. Функциональная схема (а), преобразователь (б) и общий вид (в) прибора КИМ-1

После окончания импульса блок управления 8 блокирует блок намагничивания 7 и запускает аналого-цифровой преобразователь 4. При этом на возбуждающую обмотку феррозонда-градиентометра 2-4 (диаметр 5 мм, длина 28 мм), расположенного внутри соленоида 2-2, с

генератора возбуждения феррозонда 1 подается сигнал частотой 5 кГц.

С измерительной обмотки феррозонда-градиентометра 2-4 сигнал поступает в блок измерения 3, где он усиливается, затем из него выделяется и детектируется вторая гармоника.

После детектирования сигнал обратной связи, пропорциональный измеряемому градиенту, поступает на компенсирующие катушки 2-3, охватывающие феррозонд-градиентометр 2-4, и в аналого-цифровой преобразователь 4, где он преобразуется в цифровой код и записывается в регистр памяти 5.

Сигнал об окончании измерения из аналого-цифрового преобразователя 4 поступает в блок управления 8, который снова запускает блок намагничивания 7 и блокирует аналого-цифровой преобразователь 4. Блок намагничивания 7 формирует через соленоид 2-2 импульс, амплитуда которого больше предыдущего на ΔH_m . По окончании второго намагничивающего импульса амплитудой $2 \cdot \Delta H_m$ блок управления 8 снова блокирует блок намагничивания 7 и запускает аналого-цифровой преобразователь 4.

По окончании второго и каждого последующего импульса результат измерения сравнивается с предыдущим, хранящимся в регистре памяти 5. Если результат последнего измерения больше величины, записанной в регистр памяти 5, то блок управления 8 выдает сигнал на увеличение амплитуды следующего импульса на величину ΔH_m , а при уменьшении или при прохождении 15-го импульса – на формирование серии импульсов, уменьшающихся от импульса к импульсу с шагом ΔH_m . По окончании второй серии импульсов результат последнего измерения подается на блок индикации 6, который показывает также номер импульса, при котором величина ∇H_m начала убывать. Число импульсов в двух сериях может изменяться от 3 до 29 (нечетное число).

В ручном режиме работы блок намагничивания 7 формирует возрастающие, а затем убывающие импульсы общим числом 29, после чего проводится измерение градиента ∇H_m . Общая длительность цикла измерения при 29 импульсах не превышает 40 с.

За счет компенсационной схемы диапазон измерения прибора КИМ-1 расширен до $999 \cdot 10^2$ А/м² при погрешности измерений 5 %. Важными преимуществами прибора КИМ-1 по сравнению с приборами типа ИМА [2] также являются: более высокая чувствительность к температуре термической обработки сталей с однозначной связью между механическими и магнитными свойствами, повышенная помехозащищенность (за счет более высоких абсолютных значений измеряемого градиента); нечувствительность к магнитной предыстории и пониженная чувствительность к изменению толщины изделий (показания прибора на тол-

щинах до 4 мм практически не зависят от толщины).

Габариты прибора составляют 395×350×148 мм³ (преобразователя: диаметр 56 мм, длина 135 мм), масса – 15 кг.

Анализатор импульсный магнитный многопараметровый ИМА-М

Полный гистерезисный цикл градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности ∇H_{rn} реализован в анализаторе импульсном магнитном многопараметровом ИМА-М, предназначенном для неразрушающего контроля твердости изделий машиностроения, подвергаемых закалке с последующим высокотемпературным отпуском [14]. Анализатор ИМА-М автоматически осуществляет:

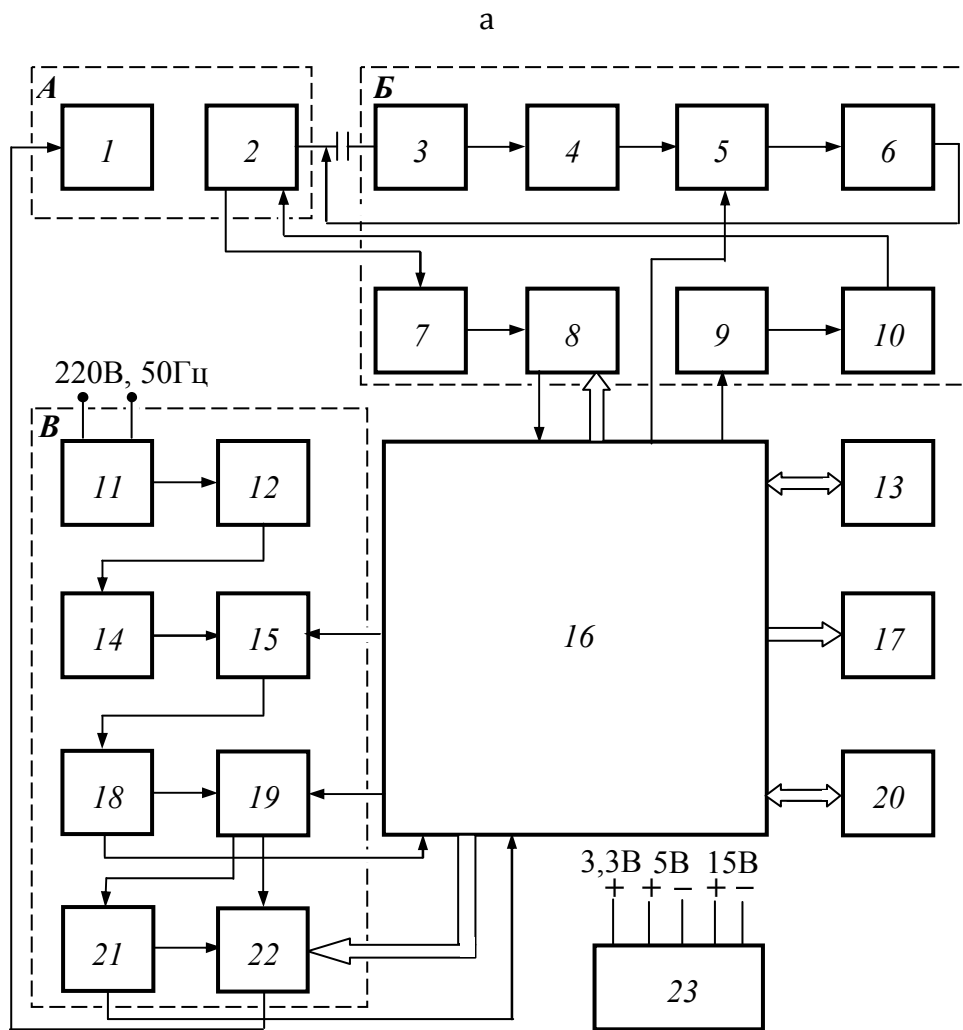
- локальное намагничивание и перемагничивание изделий 5-ю сериями изменяющихся по величине и направлению импульсов магнитного поля, создаваемого накладным соленоидом;

- измерение градиентов напряженности поля остаточной намагниченности вдоль оси соленоида в характерных точках основной кривой и петли гистерезиса градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности;

- преобразование измеренных параметров в величины твердости или других характеристик изделия по заранее установленным уравнениям множественной линейной корреляции.

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

При работе преобразователь А прибора устанавливается 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



б



Рис. 5. Функциональная схема (а) и общий вид (б) прибора ИМА-М

проходной конденсатор 12, который вместе с повышающим трансформатором 11 является ограничителем тока заряда, и быстрого разряда накопительного конденсатора 19 через разрядный ключ 22 и намагничивающий соленоид 1. Ток заряда и напряжение заряда накопительного конденсатора 19 контролируются микроконтроллером 16 посредством датчиков 18 и 21 тока заряда и напряжения соответственно. Импульсы тока, проходя через намагничивающий соленоид 1, создают импульсное магнитное поле, которое намагничивает и перемагничивает локальную область изделия (изделие на рис. 5 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. Выделение сигнала второй гармоники осуществляется полосовым фильтром 4. Протектированный сигнал через интегратор 6 подается в измерительную обмотку феррозонда-градиентометра 2 в полярности, обеспечивающей в области его расположения компенсацию градиента магнитного поля, создаваемого намагниченным образцом. Таким образом, величина компенсационного тока через измерительную обмотку феррозонда-градиентометра 2 пропорциональна измеряемому градиенту магнитного поля. Ток компенсации преобразуется датчиком 7 тока компенсации в напряжение, величина которого через программируемый усилитель 8, который обеспечивает масштабирование измеряемого сигнала в требуемом интервале напряжений, измеряется микроконтроллером 16.

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_{rnm} , ∇H_{rns} , ∇H_{rn0} , ∇H_{rnp_i} , ∇H_{rn0_i} , ∇H_{rnm_i} .

Режим работы анализатора ИМА-М задается с помощью кнопок 20 управления и отображается на ЖКИ дисплее 17. Обработку информации, введенной с кнопок 20 управления, 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 23 питания обеспечивает формирование напряжений постоянного тока, необходимых для работы устройства.

Общий вид прибора представлен на рис. 5, б.

Основные технические характеристики анализатора ИМА-М

- максимальная амплитуда импульсов напряженности намагничивающего поля на торце соленоида
 $H_{ms} = (5,2; 5,9; 6,5; 7,2; 7,8) \times 10^5$ А/м с погрешностью $\pm 5 \%$;
- шаг изменения амплитуды импульса, А/м..... $\Delta H_m = (1/9 H_{ms} \pm 5 \%)$
- диапазон измерения градиента ∇H_m напряженности поля остаточной намагниченности, А/м²..... $\pm(1 - 250) \cdot 10^3$
- относительная погрешность измерения, %, не более ± 5
- время одного измерения, не более 30 с
- анализатор автоматически сигнализирует о выходе измеряемой величины за пределы диапазона годности;
- индикация результатов контроля твердости цифровая, со ступенью квантования 0,1 ед. HRC
- время непрерывной работы в режиме ожидания, час, не менее 8
- мощность, потребляемая от сети, ВА, не более
 - в режиме ожидания.....35
 - в режиме импульсного намагничивания350
- габаритные размеры, мм, не более:
 - электронного блока 480×360×170
 - преобразователя
 - диаметр.....56
 - высота 165
- масса, кг, не более:
 - электронного блока16
 - преобразователя 0,6

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО МНОГОПАРАМЕТРОВОГО МЕТОДА

Контроль структурного состояния сталей по одному магнитному параметру во многих случаях не обеспечивает высоких коэффициентов корреляции R и низких значений среднеквадратичного отклонения S_n , а в ряде случаев (например, при контроле твердости высокоуглеродистых

сталей после закалки и последующего средне и высокотемпературного отпуска, поверхностной твердости и толщины поверхностно упрочненных слоев) невозможен.

Поскольку производительность импульсного магнитного многопараметрового метода уступает одно и двухпараметровому, то его следует применять в случае, если контроль другими методами не обеспечивает приемлемых значений R и S_n или вообще невозможен.

Наличие нескольких магнитных параметров контроля за цикл измерения обеспечивает возможность использования не только парной, но и множественной линейной корреляционной связи, например, типа

$$\text{HRC}_p = a_0 + \sum_{k=1}^N a_k \nabla H_{rnk}, \quad (1)$$

где HRC_p – расчетное значение твердости по Роквеллу, a_0 – свободный член корреляционной связи, ∇H_{rnk} – измеряемый магнитный параметр, N – число параметров, включенных в уравнение, a_k – коэффициент при соответствующем параметре.

В качестве примера рассмотрим возможность контроля твердости таких сложных с точки зрения применения магнитных методов контроля материалов, как рессорно-пружинные стали 60С2 [17] и 50ХГФА [18].

Для установления параметров, обеспечивающих наибольший коэффициент корреляции R и наименьшее среднеквадратическое отклонение S_n , с помощью программного продукта NCSS-2000 рассчитывались уравнения регрессии для всех возможных моделей: одно-, двух-, трех-, четырех-, пяти- и шестипараметровых. Число уравнений для каждой модели равнялось числу сочетаний из 6 элементов по числу параметров, используемых для модели. Так, для однопараметровой модели строилось 6 уравнений, для двухпараметровой – 15, для трехпараметровой – 20, для четырехпараметровой – 15, для пятипараметровой – 6 и для шестипараметровой – 1. Для каждой из моделей выбирались те уравнения регрессии, которые обеспечивают наибольшие коэффициенты корреляции и наименьшую дисперсию.

В табл. 1 приведены лучшие с этой точки зрения уравнения корреляции всех шести моделей для широкого интервала (100–600 °С) температур отпуска стали 60С2.

Из табл.1 видно, что увеличение количества магнитных параметров, используемых для модели, приводит к росту коэффициентов корреляции и снижению среднеквадратического отклонения во всех исследованных интервалах температур отпуска.

Таблица 1. Уравнения корреляции для определения твердости листов рессор из стали 60С2 [17]

Темп. отпуска, °С	Число параметров	Уравнение регрессии	R	S _n
100–320	1	$HRC_p = 43,120 + 1,324 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn0}$	0,983	0,499
	2	$HRC_p = 40,657 - 2,728 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rns} + 2,732 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn0}$	0,990	0,444
	3	$HRC_p = 38,508 - 2,637 \cdot 10^{-5} \nabla H_{rnm} - 3,775 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rns} + 3,474 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn0}$	0,996	0,327
	4	$HRC_p = 47,004 - 5,259 \cdot 10^{-5} \nabla H_{rnm} + 3,934 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn0} - 1,767 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp2} - 3,127 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnm2}$	0,999	0,027
	5	$HRC_p = 39,289 - 5,230 \cdot 10^{-5} \nabla H_{rnm} - 5,556 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rns} + 4,062 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn0} + 3,191 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp2} - 8,649 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn02}$	0,999	0,000
300–600	1	$HRC_p = 44,983 + 1,038 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rn02}$	0,963	1,896
	2	$HRC_p = 48,158 - 1,505 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rns} + 1,070 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rn02}$	0,976	1,599
	3	$HRC_p = 48,975 - 3,298 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnm} - 3,013 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rns} + 7,606 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp2}$	0,984	1,355
	4	$HRC_p = 49,763 - 2,979 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnm} - 2,596 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rns} + 5,804 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp2} + 2,212 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn02}$	0,984	1,404
	5	$HRC_p = 47,885 - 3,134 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnm} - 2,753 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rns} - 2,552 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn0} + 8,224 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp2} + 3,016 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnm2}$	0,985	1,462
	6	$HRC_p = 48,230 - 3,044 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnm} - 2,702 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rns} - 2,269 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn0} + 7,447 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp2} + 8,144 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn02} + 2,752 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnm2}$	0,985	1,540
100–600	1	$HRC_p = 45,963 + 1,205 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rn02}$	0,943	2,815
	2	$HRC_p = 41,732 + 1,552 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnm} + 1,237 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rn02}$	0,964	2,326
	3	$HRC_p = 49,499 + 1,865 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn0} - 1,052 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rnp2} + 2,048 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rn02}$	0,970	2,196
	4	$HRC_p = 46,010 - 3,425 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rns} + 3,528 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn0} - 9,135 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp2} + 1,759 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rn02}$	0,973	2,149
	5	$HRC_p = 52,062 - 9,864 \cdot 10^{-5} \nabla H_{rns} + 9,458 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn0} - 8,666 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp2} + 1,768 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rn02} - 1,015 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rnm2}$	0,976	2,105
	6	$HRC_p = 51,908 + 3,798 \cdot 10^{-6} \nabla H_{rnm} - 9,942 \cdot 10^{-5} \nabla H_{rns} + 9,307 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn0} - 8,606 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp2} + 1,768 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rn02} - 9,966 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnm2}$	0,976	2,185

Так, для низкотемпературного отпуска уже четырехпараметровая модель по параметрам ∇H_{rnm} , ∇H_{rn0} , ∇H_{rn02} и ∇H_{rnm2} обеспечивает коэффициент корреляции, практически равный 1 при $S_n = 0,027 HRC$. То есть

контроль твердости стали 60С2 в интервале температур отпуска 100–320 °С импульсным магнитным методом по результатам измерения градиента напряженности поля остаточной намагниченности в четырех точках в цикле намагничивание–перемагничивание возможен с точностью, не хуже точности прямых измерений по методу Роквелла.

С точки зрения практической реализации выбор измеряемых параметров и, следовательно, корреляционной модели определяется требуемой точностью контроля и его производительностью. Поэтому для контроля твердости при низкотемпературном отпуске предпочтительнее трехпараметровая модель по результатам измерения ∇H_{rnm} , ∇H_{rn0} и ∇H_{rn02} , обеспечивающая достаточную точность при уменьшенном на 10 числе импульсов цикле намагничивания в интервале изменения амплитуды от нуля до H_{ms} по восходящей ветви кривой возврата по сравнению с четырехпараметровой моделью.

Для высокотемпературного отпуска (300–600 °С) лучшей моделью является трехпараметровая, так как дальнейшее увеличение числа измеряемых параметров оставляет коэффициент корреляции без изменения, а среднеквадратичное отклонение даже увеличивается.

В широком интервале температур отпуска (100–600 °С) наилучшие результаты дает контроль по пяти параметрам: ∇H_{rms} , ∇H_{rn0} , ∇H_{rnp2} , ∇H_{rn02} и ∇H_{rnm2} , обеспечивающий коэффициент корреляции $R = 0,976$ и среднеквадратичное отклонение $S_n = 2,105$ HRC.

В интервале температур отпуска 100–600 °С стали 50ХГФА (табл. 2) однопараметровый контроль возможен только по параметрам ∇H_{rnp2} или ∇H_{rn02} , однако среднеквадратичное отклонение и коэффициенты корреляции для этих параметров недостаточны для его практической реализации. Увеличение числа магнитных параметров, используемых в модели, приводит к росту коэффициентов корреляции и уменьшению среднеквадратичного отклонения. То же можно сказать и о двухпараметровом контроле этой стали.

Лучшим среди трехпараметровых моделей для стали 50ХГФА является контроль по параметрам ∇H_{rms} , ∇H_{rnp2} , ∇H_{rn0} , требующий для своей реализации трех серий импульсов и обеспечивающий среднеквадратичное отклонение S_n , близкое к единице HRC.

Снижение S_n до величины меньше единицы обеспечивает лишь контроль по четырем параметрам. Пяти- и шестипараметровые модели не приводят к существенному повышению коэффициента корреляции и снижению среднеквадратичного отклонения, и поэтому не рекомендуются для использования при контроле отпуска стали 50ХГФА.

Таблица 2. Уравнения корреляции для определения твердости листов рессор из стали 50ХГФА для интервала температур отпуска 100–600 °С [18]

Число параметров	Лучший параметр контроля	Уравнение регрессии	R	S _n
1	∇H_{rn0}	$HRC_p = 34,68083 + 1,782777 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn0}$	0,773	4,392
1	∇H_{rnp2}	$HRC_p = 36,5869 + 4,881765 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp2}$	0,883	3,255
2	$\nabla H_{rnm},$ ∇H_{rnp2}	$HRC_p = 41,80399 - 4,558944 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnm} +$ $+ 1,315517 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rnp2}$	0,986	1,189
2	$\nabla H_{rns},$ ∇H_{rnp2}	$HRC_p = 40,61086 - 3,917176 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rns} +$ $+ 1,125596 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rnp2}$	0,988	1,121
3	$\nabla H_{rnm},$ $\nabla H_{rns},$ ∇H_{rn0}	$HRC_p = 39,82593 + 2,888447 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnm} -$ $- 6,370801 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rns} + 1,000676 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rnp2}$	0,988	1,143
3	$\nabla H_{rns},$ $\nabla H_{rnp2},$ ∇H_{rn02}	$HRC_p = 42,29781 - 4,611518 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rns} +$ $+ 1,203056 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rnp2} - 1,144022 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn02}$	0,990	1,019
4	$\nabla H_{rnm},$ $\nabla H_{rns},$ $\nabla H_{rnp2},$ ∇H_{rn02}	$HRC_p = 40,86952 + 6,822742 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnm} -$ $- 1,058242 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rns} + 9,275348 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp2} -$ $- 1,432759 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn02}$	0,992	0,977
4	$\nabla H_{rns},$ $\nabla H_{rn0},$ $\nabla H_{rnp2},$ ∇H_{rn02}	$HRC_p = 43,31081 - 3,92957 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rns} -$ $- 8,997854 \cdot 10^{-5} \nabla H_{rn0} + 1,30225 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rnp2} -$ $- 1,177065 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn02}$	0,990	1,045
5	$\nabla H_{rnm},$ $\nabla H_{rns},$ $\nabla H_{rn0},$ $\nabla H_{rnp2},$ $\nabla H_{rn02},$	$HRC_p = 43,86951 + 1,118788 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rnm} -$ $- 1,176781 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rns} - 3,476376 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn0} +$ $+ 1,134499 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rnp2} - 1,745156 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn02}$	0,993	0,925
5	$\nabla H_{rnm},$ $\nabla H_{rns},$ $\nabla H_{rnp2},$ $\nabla H_{rn02},$ ∇H_{rnm2}	$HRC_p = 40,92905 + 6,71039 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnm} -$ $- 1,048737 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rns} + 9,32975 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp2} -$ $- 1,431264 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn02} - 4,63992 \cdot 10^{-7} \nabla H_{rnm2}$	0,992	1,010
6	$\nabla H_{rnm},$ $\nabla H_{rns},$ $\nabla H_{rn0},$ $\nabla H_{rnp2},$ $\nabla H_{rn02},$ ∇H_{rnm2}	$HRC_p = 44,20105 + 1,116268 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rnm} -$ $- 1,159632 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rns} - 3,684585 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn0} +$ $+ 1,160776 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rnp2} - 1,76005 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn02} -$ $- 1,183785 \cdot 10^{-6} \nabla H_{rnm2}$	0,993	0,951

Для контроля высокотемпературного отпуска стали 35 наиболее перспективным является четырехпараметровая модель при $i = 1$.

$$HRC = 6,329 - 1,062 \cdot 10^{-2} \nabla H_{rns} + 2,905 \cdot 10^{-2} \nabla H_{rn0} - \\ - 2,418 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rn01} - 1,98 \cdot 10^{-2} \nabla H_{rnm1} \quad (2)$$

с коэффициентом корреляции $R = 0,982$ при среднеквадратическом отклонении $S_n = 1,463$ HRC [19].

Для поковок из стали 45 информативными параметрами установлены величины ∇H_{rns} , ∇H_{rn0} , ∇H_{rnp3} и ∇H_{rnm3} [20]. При этом среднеквадратичное отклонение $S_n = 2,1$ HRC, коэффициенте корреляции $R = 0,9$, а уравнение корреляции имеет вид:

$$HRC_p = 10,248 - 0,318 \nabla H_{rns} + 0,266 \nabla H_{rn0} + 0,485 \nabla H_{rnp3} + 0,298 \nabla H_{rnm3} \quad (3)$$

Анализатор ИМА-М апробирован на ОАО «ТАИМ» для контроля глубины упрочненного слоя после цементации червячного вала типа 64226-3501141 из стали 20ХН3А 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) [21].

Многопараметровый метод испытан также на возможность применения для контроля твердости и глубины закаленного слоя после закалки ТВЧ штоков гидравлических амортизаторов из стали 45 (диаметр 12,35 мм, длина 228 ± 13 мм) [22, 23]. Показано, что расчет по пяти параметрам позволяет достаточно точно воспроизвести HRC_n и h . На основании проведенных измерений были получены следующие уравнения для расчета твердости

$$HRC_{np} = 60,87684 + 3,120482 \cdot 10^{-2} \nabla H_{rnm} - 7,918616 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rns} - \\ - 2,205681 \cdot 10^{-2} \nabla H_{rn0} - 6,81563 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp1} + 5,972872 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn01} \quad (4)$$

и глубины упрочненного слоя

$$h_p = 1,485343 + 3,666426 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rnm} - 9,555659 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rns} - \\ - 2,62297 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rn0} - 6,81563 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp1} + 5,972872 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn01} \quad (5)$$

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 повысить коэффициент корреляции и уменьшить дисперсию при контроле структурного состояния ряда марок сталей, обеспечить контроль твердости и толщины поверхностно упрочненных слоев, причем увеличение числа измеряемых параметров увеличивает коэффициент корреляции и уменьшает среднеквадратичное отклонение.

Намагничивание двумя сериями импульсов одной полярности, сначала возрастающих, а затем убывающих по амплитуде, и последующее измерение градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности позволяет повысить чувствительность к температуре термической обработки сталей с однозначной связью между механическими и магнитными свойствами, повысить помехозащищенность, снизить чувствительность к магнитной предыстории и к изменению толщины изделий.

Разработанный для реализации импульсного многопараметрового магнитного метода анализатор ИМА-М рекомендуется применять для контроля структурного состояния ответственных изделий машиностроения, когда контроль другими методами не обеспечивает приемлемых значений коэффициента корреляции и среднеквадратичного отклонения или вообще невозможен.

Литература

1. Мельгуй М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей. Минск: Наука и техника, 1980. – 184 с.
2. Матюк В.Ф. Приборы магнитной структуроскопии на основе локального однополярного импульсного намагничивания. – Неразрушающий контроль и диагностика, 2012, № 2, с. 29–64.
3. Матюк В.Ф. Приборы магнитной структуроскопии на основе локального двухполярного импульсного намагничивания. – Неразрушающий контроль и диагностика, 2012, № 4, с. 20–45.
4. Бида Г.В. Учет статистического веса используемых факторов при исследовании склонности стального проката к хрупкому разрушению. – Дефектоскопия, 2011, № 3, с. 22–31.
5. Бида В.Р., Ничипурук А.П. Многопараметровые методы в магнитной структуро-

- скопии и неразрушающем контроле механических свойств сталей. – Дефектоскопия, 2007, № 8, с. 4–24.
6. Костин В.Н., Сташков А.Н., Осинцев А.А. Использование магнитных свойств вещества для многопараметровой структуроскопии ферромагнитных изделий. – В кн.: Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов. Материалы международной научно-техн. конф., Могилев, 2004, с. 107–108.
 7. Мельгуй М.А., Кратиров В.Б. Аномальный гистерезис поля остаточной намагниченности и его градиента при намагничивании ферромагнетика импульсным магнитным полем. – Дефектоскопия, 1986, № 12, с. 64–70.
 8. Поливанов К.М. Ферромагнетики. Основы теории технического применения. – М.-Л.: ГЭИ, 1957. – 256 с.
 9. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Использование необратимых магнитных характеристик ферромагнетиков в магнитном структурном анализе. – В кн.: IX Всесоюзная научно-техническая конференция «Неразрушающие физические методы и средства контроля», 26–28 мая (Тезисы докладов) Секция В. Магнитные методы, Минск, 1981, с. 27–29
 10. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф. Импульсный магнитный анализатор ИМА-5. – Дефектоскопия, 1979, № 11, с. 90–95.
 11. Матюк В.Ф. Особенности влияния амплитуды и числа импульсов магнитного поля на величину градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности при локальном намагничивании толстых изделий. – Дефектоскопия, 1996, № 3, с. 18–24.
 12. Матюк В.Ф., Мельгуй М.А. Разработка нового прибора для магнитной структуроскопии на основе особенностей гистерезиса остаточной намагниченности при импульсном перемагничивании изделия. – Приборы и методы измерений, 2011, № 1, с. 17–24.
 13. Старцева И.Е., Шур Я.С. Изменение магнитного состояния мягких магнитных материалов под действием переменных магнитных полей. – ФММ, 1956, т. III, вып. 1, с. 190–191.
 14. Матюк В.Ф., Мельгуй М.А., Пинчуков Д.А., Любарец А.Л. 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. – Дефектоскопия, 2005, № 5, с. 3–13.
 15. Мельгуй М.А., Кратиров В.Б., Цукерман В.Л. Импульсный магнитный структуроскоп КИМ-1. – Дефектоскопия, 1988, № 3, с. 31–35.
 16. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. М: Наука, 1993. – 250 с.
 17. Матюк В.Ф., Мельгуй М.А., Пинчуков Д.А., Любарец А.Л. 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. II. Сталь 60С2. – Дефектоскопия, 2005, № 5, с. 14–23.
 18. Матюк В.Ф., Мельгуй М.А., Пинчуков Д.А., Любарец А.Л. Контроль прочностных характеристик и качества термообработки ферромагнитных изделий по па-

- раметрам петли гистерезиса остаточной намагниченности при их локальном намагничивании и перемагничивании импульсным магнитным полем изменяющейся амплитуды. III. Сталь 50ХГФА. – Дефектоскопия, 2005, № 8, с. 57–67.
19. Матюк В.Ф., Мельгуй М.А., Пинчуков Д.А., Аброскина С.А. Новые возможности импульсного магнитного метода контроля твердости изделий из ферромагнитных сталей. – Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук, 2006, № 2, с. 114–120.
 20. Матюк В.Ф., Мельгуй М.А., Пинчуков Д.А., Аброскина С.А. Контроль качества высокотемпературного отпуска изделий из среднеуглеродистой качественной стали 45 многопараметровым импульсным магнитным методом. – Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн.навук. 2006, № 3, с. 113 – 118.
 21. Матюк В.Ф., Мельгуй М.А., Пинчуков Д.А. Исследование возможности контроля качества цементации импульсным магнитным многопараметровым методом. – В кн.: Инженерия поверхностного слоя деталей машин. Сборник материалов 2-й международной научно-практич. конф., 27–28 мая 2010 г. – Минск: БНТУ, 2010, с. 217–218.
 22. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф. Контроль качества закалки ТВЧ импульсным магнитным многопараметровым методом. – В кн.: Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов. Материалы 3-й международной научно-технич. конф. Могилев, 23–25 сентября 2009 г. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2009, с. 138–140.
 23. Матюк В.Ф., Мельгуй М.А., Пинчуков Д.А. Способ контроля толщины и твердости поверхностно-упрочненного слоя изделий из ферромагнитного материала. – Патент РБ № 10698. – Афіцыйны бюлетэнь, 2008, № 3, с. 151–152.

Статья поступила в редакцию 18.02.13