

There are given the results of development in the State scientific university "Institute of applied physics of the National Academy of Sciences of Belarus" of the facilities for magnetic control of the steels mechanical characteristics - coercimeter KIPF-1, impulse magnetic analyzers IMA-4M, IMA-5B, impulse magnetic installations IMPOK-1B and facilities of their metrological support. The information about the scale of their using is given.

В. Ф. МАТЮК, М. А. МЕЛЬГУЙ, ГНУ ИПФ НАН Беларуси

УДК 620.179.14

НОВЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЙ

Конкурентоспособность продукции может быть обеспечена лишь высоким техническим уровнем производства и надежным контролем качества.

Потребительские свойства стального проката во многом определяются его механическими свойствами (пределом прочности, пределом текучести, твердостью, относительным удлинением и относительным сужением при разрыве). Выборочный разрушающий контроль этих свойств малопроизводителен и не гарантирует качества всей продукции.

Среди неразрушающих методов контроля механических свойств наибольшее развитие получил магнитный метод. Его преимуществами перед методом прямых испытаний являются более высокая производительность контроля, экономия металла и энергозатрат вследствие отсутствия необходимости изготовления специальных образцов для испытаний. Физической основой магнитного метода служит наличие однозначной связи между механическими и магнитными свойствами контролируемых изделий.

Большой объем исследований, проведенных в Институте прикладной физики НАН Беларуси [1] и Институте физики металлов Уральского отделения академии наук России [2], показал, что магнитный контроль возможен для всех конструкционных горячекатаных и холоднокатаных после рекристаллизационного отжига углеродистых сталей с содержанием углерода до 0,3 %; среднеуглеродистых холоднокатаных и горячекатаных качественных сталей общего назначения с содержанием углерода 0,35–0,5%; среднеуглеродистых конструкционных низколегированных; конструкционных углеродистых и легированных качественных сталей – контроль недогрева при закалке и низкотемпературного (0–300°C) отпуска для снятия внутренних напряжений.

Среди магнитных методов наиболее широкое распространение получили метод коэрцитиметрии и импульсный магнитный метод. В первом случае магнитной характеристикой является коэрцитивная сила H_c , измеряемая обычно коэрцитиметром с приставным П-образным электромагнитом, а во втором – градиент ∇H , напряженности поля

остаточной намагниченности после локального намагничивания изделия импульсным полем накладного соленоида. Методы коэрцитиметрии успешно решают задачи контроля твердости изделий после закалки и низкотемпературного (100–300 °С) отпуска средне- и высокоуглеродистых, а также легированных марок сталей. Импульсный магнитный метод обеспечивает контроль твердости, прочности, относительного удлинения и сужения низкоуглеродистых горячекатаных и холоднокатаных сталей после рекристаллизационного отжига.

Наиболее весомый вклад в развитие метода коэрцитиметрии и разработку коэрцитиметров с приставным электромагнитом внесли сотрудники Института физики металлов Уральского отделения академии наук России [2].

В Институте прикладной физики НАН Беларуси в 2002 г. разработан коэрцитиметр КИПФ-1, в котором использованы новейшие достижения электроники и информатики.

Принцип действия коэрцитиметра КИПФ-1 основан на намагничивании и перемагничивании изделия с помощью приставного П-образного электромагнита и измерения тока перемагничивания в момент равенства нулю магнитного потока. Процесс намагничивания – перемагничивания – измерения автоматизирован. Для устранения влияния магнитной предыстории осуществляется магнитная тренировка разнополярными импульсами.

Коэрцитиметр КИПФ-1 позволяет измерять коэрцитивную силу в диапазоне 135–4500 А/м с относительной погрешностью не более 5%. Продолжительность одного измерения – не более 15 с. Индикация результатов измерения – цифровая. Прибор имеет выход для подключения ПЭВМ. Градуировка и поверка осуществляются по стандартным образцам. Потребляемая мощность – не более 300 ВА, габаритные размеры – 325×240×140 мм. Масса – не более 9 кг. Замена прямых измерений механических свойств массово изготавливаемых изделий неразрушающим контролем с помощью коэрцитиметра КИПФ-1 позволяет экономить металл, повысить производи-

тельность труда при контроле, гарантировать качество изделий. Измерения и обработку их результатов проводили по ГОСТ 30415-96.

Коэрцитиметры КИПФ-1 прошли государственные испытания, внесены в государственный реестр средств измерений Республики Беларусь, № РБ 0320176402, России – № 25988-03 и имеют сертификаты РБ № 2328 и России № 16443. Общий вид коэрцитиметров показан на рис. 1.

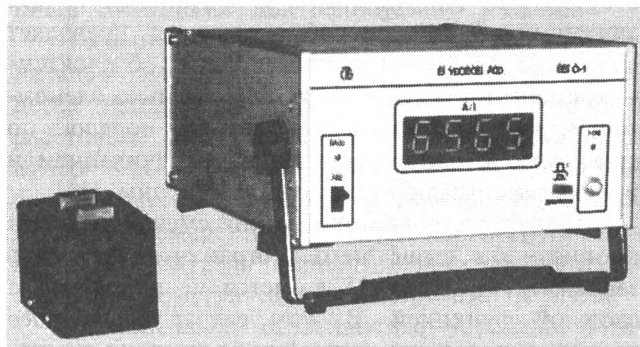


Рис. 1. Коэрцитиметр КИПФ-1

Импульсный магнитный метод разработан в Институте прикладной физики НАН Беларуси в 70-х годах [3] и интенсивно развивается до настоящего времени. Его отличительной особенностью является высокая чувствительность к измеряемому магнитному параметру и низкая чувствительность к влиянию мешающих факторов.

Сущность метода (рис. 2, а) заключается в том, что намагничивание контролируемого изделия 1 осуществляют импульсным магнитным полем малогабаритного соленоида 2, ось которого перпендикулярна поверхности испытуемого листа. При пропускании импульса тока через такой соленоид создаваемое им импульсное магнитное поле локально и неоднородно намагничивает испытуемое изделие до определенного значения намагниченности, различного в разных точках объекта контроля. После окончания импульса намагниченность в каждой точке уменьшится до соответствующего значения намагниченности M_r , внешним проявлением которой будет результиру-

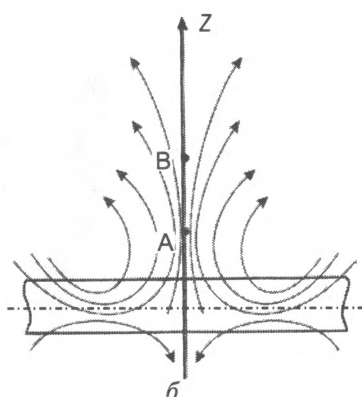
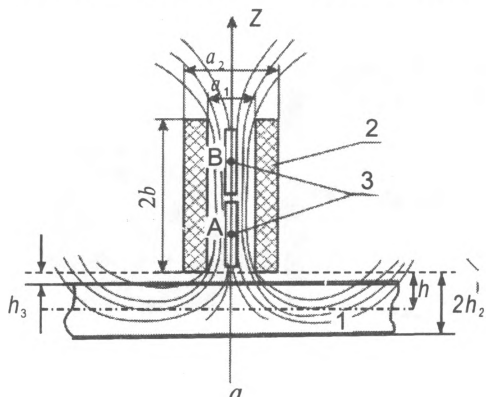


Рис. 2. Импульсный магнитный метод контроля: а – способ намагничивания; б – распределение напряженности поля остаточной намагниченности внутри и вне испытуемого изделия

ющее магнитное поле H_r над испытуемым участком (рис.2, б). Твердость и другие свойства изделий определяют по величине градиента $\nabla H_r = H_{rA} - H_{rB}$ напряженности поля остаточной намагниченности, измеряемого двухэлементным феррозондом-градиентометром 3, расположенным на оси соленоида. В качестве источника энергии для получения сильных импульсных полей, формируемых соленоидом, используется энергия заряда батареи конденсаторов.

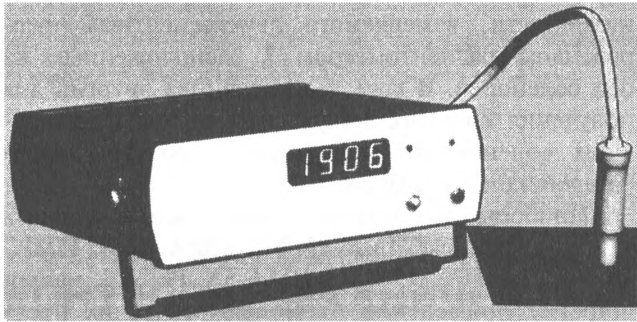
Приборы этого типа – импульсные магнитные анализаторы ИМА-2А [4], ИМА-4 [5], ИМА-4А [6, 7], ИМА-5 [8], ИМА-5А [9, 10] нашли широкое применение на металлургических предприятиях Беларуси, России, Украины, Казахстана, Болгарии, Чехии, Германии, Японии для контроля механических свойств листового проката низкоуглеродистых сталей. По показаниям прибора определяют твердость, предел прочности, относительное удлинение, относительное сужение и баллы зерна феррита и цементита. Всего в 1970–1990 гг. внедрено на различных предприятиях более 400 приборов.

В настоящее время разработана новая модель приборов этого типа – ИМА-4М [11], зарегистрированная в государственном реестре средств измерения Республики Беларусь, № РБ 01314101899, сертификат №1094 и государственном реестре России, № 19948-00, сертификат № 8535. Приборы ИМА-4М внедрены на ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» и ОАО «Северсталь», г. Череповец.

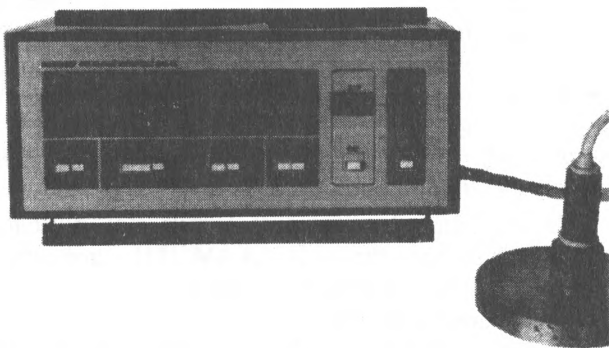
На рис. 3, а показан общий вид прибора ИМА-4М. Он предназначен для контроля механических свойств изделий толщиной 0,15–4,0 мм. Диапазон измерения градиента ∇H_r напряженности магнитного поля от 200 до 20000 А/м², погрешность измерения не превышает 5%. Изменение зазора между преобразователем и изделием на 0,1 мм приводит к дополнительной погрешности не более 1,5%, амплитуда намагничивающих импульсов – $2,1 \cdot 10^5$ А/м, время контрольной операции – не более 10 с, зона влияния краевого эффекта – 100 мм. Имеется выход для подключения ПЭВМ. Габаритные размеры – 320×320×100 мм. Масса – не более 7 кг. Метрологическое обеспечение осуществляется с помощью меры градиента магнитного поля МГП-2.

Для изделий толщиной более 4 мм предназначены приборы типа ИМА-5Б [12, 13], позволяющие автоматически выбирать режим намагничивания, обеспечивающий отстройку от влияния зазора между

преобразователем и испытуемым изделием до 2 мм, что дает возможность контроля свойств изделий, имеющих слой защитного покрытия из полимеров, краски и т.п. (рис. 3, б).



а



б

Рис. 3. Импульсные магнитные анализаторы: а – ИМА-4М; б – ИМА-5Б

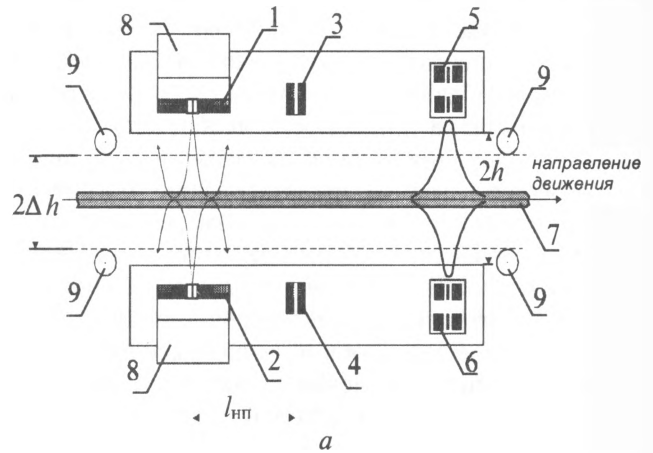
Наиболее существенным достижением является разработка импульсного метода контроля механических свойств листового проката в процессе его движения в технологическом потоке производства. Его сущность [14] заключается в том, что движущийся лист намагничивают с двух противоположных сторон импульсным магнитным полем соосных встречно включенных соленоидов, считывают градиенты напряженности поля остаточной намагниченности с обеих сторон, усредняют их максимальные величины и по полученному значению судят о физико-механических свойствах контролируемого материала. Преобразователь установки для реализации способа [15] содержит (рис. 4, а) два намагничивающих соленоида 1 и 2, два феррозонда-градиентометра 5 и 6, расположенных на некотором расстоянии от соленоидов по ходу движения листа 7. Контролируемый материал 7 движется в зазоре между намагничивающими соленоидами 1 и 2, охлаждаемыми радиаторами 8 и элементами 5 и 6 магниточувствительной системы. Возможные смещения листа от нейтрального положения ограничены валками 9, расстояние между которыми $2\Delta h$. Расстояние между преобразователями $2h$. Импульсное магнитное поле соленоидов создает на движущемся листе намагниченные участки, несущие

информацию о его свойствах. Когда контролируемый лист проходит точно посередине между феррозондами, сигналы, снимаемые с них, одинаковы и суммарный сигнал равен удвоенной величине сигнала с одного феррозонда. При отклонении листа в сторону одного из феррозондов, сигнал, наводимый в нем, увеличивается, а в другом – уменьшается, но сумма их изменяется незначительно, в результате чего и происходит отстройка от вибрационных колебаний листа при движении. Такой способ измерения позволяет снизить относительную погрешность, обусловленную смещением последнего относительно элементов преобразователя, более чем на порядок по сравнению с односторонним намагничиванием и измерением градиента с одной стороны [16].

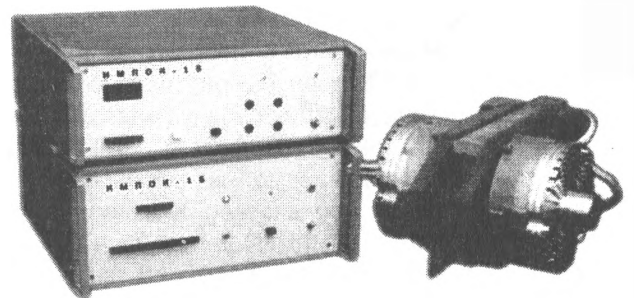
Полная отстройка от влияния смещений листа в описанном выше методе ограничена тем, что зависимость ∇H_r от Δh является не линейной, а сложной функцией. В этом случае дальнейшее расширение области отстройки от влияния смещений может быть достигнуто нахождением их среднего геометрического [17, 18].

При двухстороннем намагничивании градиент, измеренный магниточувствительным элементом, расположенным с одной стороны изделия, равен

$$\nabla H_{r1} = \nabla H_{r0} e^{\Delta h_{\text{отн}}}, \quad (1)$$



а



б

Рис. 4. Установка импульсная магнитная ИМПОК-1Б: а – расположение элементов преобразователя относительно контролируемого листа; б – общий вид

а измеренный с другой стороны

$$\nabla H_{r2} = \nabla H_{r0} e^{-\Delta h_{\text{отн}}}. \quad (2)$$

Среднее геометрическое измеренных сигналов составляет

$$\nabla H_{r\tau} = \sqrt{\nabla H_{r1} \nabla H_{r2}} = \nabla H_{r0}, \quad (3)$$

где ∇H_{r0} – величина градиента при $h = 0$. Оно не зависит от величины смещения и определяется лишь свойствами контролируемого изделия.

Экспериментально установлено, что для сравнительно небольших смещений Δh листа в процессе испытаний ($\Delta h < 10$ мм) следует выбирать расстояние между торцами элементов преобразователя < 21 мм и контроль вести по среднему арифметическому градиентов нормальной составляющей, измеренных с двух его сторон. При $\Delta h > 10$ мм контроль предпочтительнее проводить по среднему геометрическому измеренных величин.

Отличительной особенностью установки ИМПОК-1А [19] является возможность контроля как по среднему арифметическому (смещение до ± 10 мм), так и по среднему геометрическому (смещение до ± 20 мм) максимальных значений нормальных составляющих градиента поля остаточной намагниченности с двух сторон листа, а также компенсационный метод измерений [20]. Это позволило расширить в 2 раза по сравнению с ИМПОК-1 диапазон допустимых вибрационных смещений листа при движении, улучшить метрологические характеристики, повысить временную и температурную стабильность установки. Дополнительным достоинством установки ИМПОК-1А является возможность проверки ее работоспособности по контрольному образцу.

Контроль установками типа ИМПОК-1 и ИМПОК-1А ведется на сплошной полосе металла. При контроле отдельно движущихся листов возникают трудности из-за влияния края листа (так называемый краевой эффект) и промежутков между листами на достоверность контроля. Установка ИМПОК-1Б [21] позволяет контролировать как сплошную полосу, так и отдельно следующие листы. Для этого в преобразователь установки вводится трансформаторный датчик края листа [22], излучающая катушка 3 которого размещена с одной стороны листа, а приемная 4 – с другой (рис. 4, а).

Кроме возможности полистного контроля, в установке ИМПОК-1Б в 2,5 раза (по сравнению с установками ИМПОК-1 и ИМПОК-1А) увеличена амплитуда намагничивающих импульсов [23] и изменена геометрия намагничивающих соленоидов, что позволило расширить диапазон толщины контролируемых листов до 12 мм и диапазон допустимых смещений Δh листа при движении до ± 30 мм, в 1,5 раза увеличен диапазон измеряемых градиентов. Установка ИМПОК-1Б имеет цифровую индикацию ре-

зультатов измерения и автоматическое переключение поддиапазонов измерения, предусмотрены возможность подключения самописца и датчика скорости. Имеется выход информации о свойствах контролируемого металла в двоичном коде.

Общий вид установки показан на рис. 4, б.

Выбор частоты намагничивающих импульсов осуществляется как в ручном, так и в автоматическом (при наличии датчика скорости листа) режимах. При полистном контроле на каждом отдельно следующем листе измерение производится один раз.

Как показали испытания, изменение показаний измерительного блока установки ИМПОК-1Б, вызванное изменением скорости движения контролируемого листа на 1 м/с в интервале от 0,1 до 5 м/с, не превышает 0,25%. Установки ИМПОК-1Б прошли государственные испытания на базе Белорусского государственного института метрологии, внесены в Госреестры Республики Беларусь, № РБ 0314161702 (сертификат № 1952) и России, № 25905-03 (сертификат № 16274).

Установки ИМПОК-1Б поставлены на Магнитогорский металлургический комбинат и (по контракту) на комбинат ЭКО «Сталь» ГмбХ (ФРГ, г. Айзенхюттенштадт). Немецкая фирма «Электро-Механик ГмбХ (ЕМГ)» (г. Венден) производит и реализует установки типа ИМПОК-1Б по лицензионному соглашению с ИПФ НАН Беларуси.

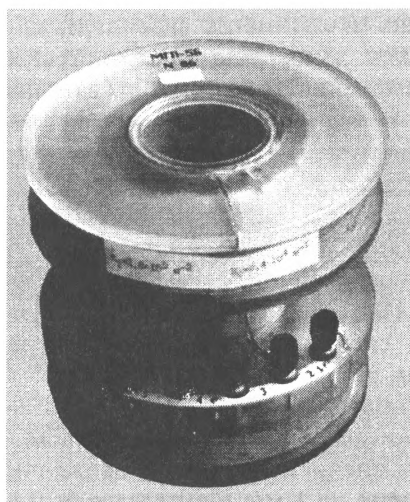
Метрологическое обеспечение средств импульсного магнитного контроля механических свойств

Успешному внедрению средств импульсного магнитного контроля способствовала и разработка новых способов и средств их метрологического обеспечения [24–27].

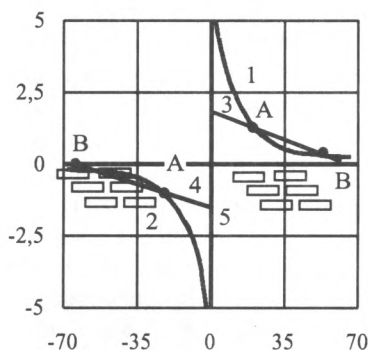
В основу методики поверки приборов импульсного магнитного контроля положен принцип моделирования поля остаточной намагниченности изделия с помощью специальных источников, создающих в рабочей области меры магнитное поле, распределение которого вдоль оси этой области подобно распределению поля от локально намагниченного участка.

Для аттестации приборов типа ИМА разработана мера градиента магнитного поля (МГП) (рис. 5, а). Методика поверки приборов с помощью мер типа МГП утверждена Госстандартом СССР. Их аттестацию проводит ВНИИМ им. Д.И. Менделеева (г. Санкт-Петербург).

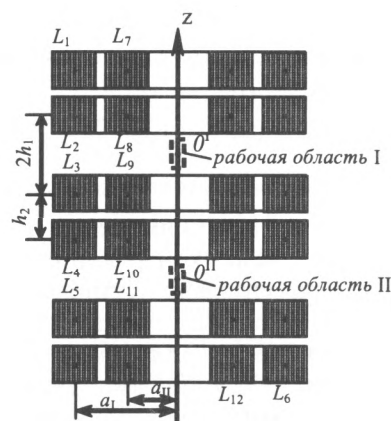
Для метрологической аттестации установок типа ИМПОК необходимо было создать источник градиентов напряженности магнитных полей, который формирует в областях 5 расположения феррозондов (рабочих областях) магнитные поля 3, 4 с постоянным градиентом, причем величина и знак напряженности полей, воздействующих на соответствующие феррозонды, должны совпадать



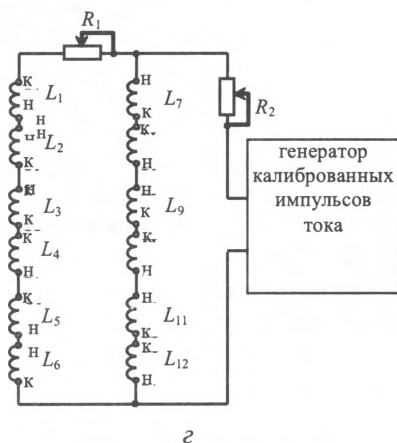
а



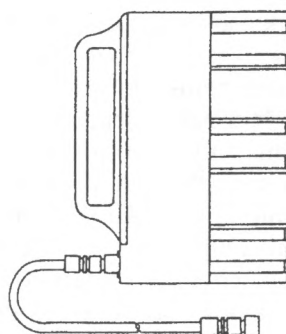
б



в



г



д

Рис. 5. Меры градиента магнитного поля для поверки приборов типа ИМА (а) и ИМПОК (б-д): а – мера МГП; б – изменение ∇H_r по обе стороны ферромагнитного листа; г – принципиальная схема соединения катушек меры; д – общий вид меры МГПД

с величиной и знаком напряженности полей 1 и 2 от локально намагниченного с двух сторон образца, которые направлены с разных сторон листа в противоположные стороны (рис. 5, б) и с увеличением расстояния от его поверхности уменьшаются по абсолютной величине примерно по экспоненциальному закону.

В качестве источника, удовлетворяющего указанному выше требованиям, предложена мера [26, 27], состоящая из трех пар катушек $L_1 - L_2$, $L_3 - L_4$, $L_5 - L_6$ (рис. 5, в) со средним радиусом a_I для создания однородных полей противоположной полярности в рабочих областях I и II и трех пар катушек $L_7 - L_8$, $L_9 - L_{10}$, $L_{11} - L_{12}$ со средним радиусом a_{II} для создания в рабочих областях I и II полей с постоянным градиентом (все катушки системы соосны). Катушки в парах системы для создания однородных полей противоположных полярностей соединены между собой последовательно-встречно, а катушки соседних пар – последовательно-согласно. Катушки системы для создания полей с постоянным градиентом соединены между собой последовательно-встречно.

Электрическая схема соединения катушек меры приведена на рис. 5, г.

Расчеты показали [25], что при соотношениях длины p и толщины s обмоток $p_1/s_1 = 0,928$ (для a_I) и $p_2/s_2 = 0,917$ (для a_{II}), длине рабочей области меры 30 мм (определяется длиной используемых феррозондов), расстоянии h_2 между катушками в парах 50 мм (определяется зазором между преобразователями) расстояние между катушками в парах должно быть $h_2 = 30$ мм (при длине обмотки $p = 10$ мм) и расстояние между парами катушек $2h_1 = 60$ мм. Средние радиусы катушек должны быть $a_I = 46$ мм и $a_{II} = 31$ мм.

Если N_I и N_{II} – соответственно число витков катушек со средними радиусами a_I и a_{II} , для выбранных h_1 и h_2 и рассчитанных a_I и a_{II} получим

$$H_I = k_I N_I I_1, \quad (4)$$

где $k_I = 5 \text{ м}^{-1}$,

$$\nabla H_{II} = k_{II} N_{II} I_2, \quad (5)$$

где $k_{II} = 533 \text{ м}^{-2}$.

Конструкция меры МГПД (рис. 5, д) позволяет надвигать ее на преобразователи установки ИМПОК в зоне расположения феррозондов. При этом последние оказываются в рабочих областях меры. Меняя величину тока через обмотки меры, можно получить в ее рабочих областях магнитные поля необходимой величины и конфигурации для метрологической аттестации установки ИМПОК.

Выводы

Разработаны новые средства магнитного контроля механических свойств изделий из ферромагнитных сталей – приборы типа КИПФ, ИМА для контроля неподвижных изделий и установки типа ИМПОК для контроля изделий, движущихся в технологическом потоке производства со скоростью до 5 м/с. Разработано их метрологическое обеспечение. Приборы сертифицированы в Республике Беларусь и России. Осуществлено внедрение на предприятиях ближнего и дальнего зарубежья.

Литература

1. Мельгуй М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей. Мн.: Наука и техника, 1980.
2. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. М.: Наука, 1993.
3. А.с. СССР 331303: Устройство для определения твердости ферромагнитных изделий / Н.С. Акулов, М.А. Мельгуй.
4. Мельгуй М.А. Импульсный магнитный анализатор ИМА-2А // Неразрушающие методы и средства контроля и их применение в промышленности. Мн.: Наука и техника, 1973. С. 81–90.
5. Мельгуй М.А., Мальцев В.Л., Пиунов В.Д., Цысецкий И.А. Импульсный магнитный анализатор ИМА-4 // Дефектоскопия. 1979. № 3. С. 29–32.
6. А.с. СССР 998934: Импульсный магнитный анализатор / В.Л.Цукерман, И.И. Линник, М.А. Мельгуй.
7. Мельгуй М.А., Пиунов В.Д., Цукерман В.Л. Импульсный магнитный анализатор ИМА-4А // Дефектоскопия. 1986. № 11. С. 63–67.
8. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф. Импульсный магнитный анализатор ИМА-5. // Дефектоскопия. 1979. № 11. С. 90–95.
9. А.с. СССР 884406: Способ импульсного магнитного контроля механических свойств ферромагнитных изделий / М.А. Мельгуй, В.Ф. Матюк.
10. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф., Крутикова Л.А., Шитова Г.М., Алексеева В.К. Контроль горячекатаного проката сталей 3сп и 10сп с помощью приборов типа ИМА-5А // Завод. лаб. 1988. Т. 54. № 4. С. 65–68.

11. Матюк В.Ф., Мельгуй М.А., Осипов А.А., Пиунов В.Д., Кулагин В.Н. Импульсный магнитный анализатор ИМА-4М // Дефектоскопия. 2003. № 3. С. 47–53.
12. А.с. СССР 1128155: Устройство для импульсного магнитного контроля физико-механических параметров ферромагнитных изделий / М.А. Мельгуй, В.Ф. Матюк, В.Л. Цукерман, И.И. Линник.
13. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф., Олех Я.А., Цукерман В.Л. Импульсный магнитный анализатор ИМА-5В // Науч.-техн. достижения. 1990. № 4. С. 41–44.
14. А.с. СССР 974242: Способ электромагнитного контроля физико-механических параметров движущегося ферромагнитного материала / М.А. Мельгуй, В.Ф. Матюк.
15. А.с. СССР 587776: Устройство для электромагнитного контроля механических свойств движущихся ферромагнитных материалов в форме протяженных прутков, лент и профильного проката / М.А. Мельгуй, В.Ф. Матюк, А.А. Востриков.
16. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф. Импульсный магнитный поточный контролер ИМПОК-1 // Дефектоскопия. 1982. № 9. С. 62–66.
17. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф. Расширение области отстройки от влияния изменений зазора между преобразователем и контролируемым изделием при импульсном магнитном методе контроля // Дефектоскопия. 1982. № 11. С.46–49.
18. А.с. СССР 1022085: Устройство для измерения параметров движущихся ферромагнитных изделий / М.А. Мельгуй, В.Ф. Матюк, И.И. Линник, В.Л. Цукерман.
19. Матюк В.Ф., Цукерман В.Л. Импульсный магнитный поточный контролер ИМПОК-1А // Дефектоскопия. 1992. № 4. С. 38–43.
20. А.с. СССР 1698735: Способ электромагнитного контроля физико-механических параметров движущегося ферромагнитного материала и устройство для его осуществления / М.А. Мельгуй, В.Ф. Матюк.
21. Матюк В.Ф., Осипов А.А. Импульсный магнитный метод контроля отдельно движущихся листов в технологическом потоке производства // Дефектоскопия. 1995. № 6. С. 56–62.
22. А.с. СССР 1810856: Устройство для импульсного магнитного контроля листового проката сталей / В.Ф. Матюк, М.А. Мельгуй, А.П. Новиков, А.А. Осипов.
23. А.с. СССР 1762391: Генератор импульсов / А.А. Осипов, В.Ф. Матюк.
24. Мельгуй М.А., Пиунов В.Д. Метрологическое обеспечение импульсно-локального магнитного метода контроля // Новые физические методы неразрушающего контроля качества продукции. М.:МДНТП, 1977. С. 130–135.
25. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф., Пиунов В.Д. Метрологическое обеспечение приборов импульсного магнитного контроля ферромагнитных материалов // Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1987. № 2. С. 107–112.
26. А.с. СССР 1255910: Устройство для калибровки и проверки средств магнитного контроля ферромагнитных изделий / М.А. Мельгуй, В.Ф. Матюк, В.Д. Пиунов.
27. А.с. СССР 1029070: Способ калибровки и проверки импульсных устройств для магнитного контроля / М.А. Мельгуй, В.Ф. Матюк, И.Г. Леонов.