



Analysis of modern state of theoretical and experimental investigations and instrument realization of magnetic control of structure of the articles of ferromagnetic steels and cast irons is carried out. It is shown that many control problems can be solved directly in workshops and laboratories.

С. Г. САНДОМИРСКИЙ, ОИМ НАН Беларуси

УДК 620.179.14

МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ СТРУКТУРЫ СТАЛЬНЫХ И ЧУГУННЫХ ИЗДЕЛИЙ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ (обзор)

Введение

На металлургических и машиностроительных предприятиях выпускаются массовые партии изделий из сталей и чугунов, заданная структура и механические свойства которых достигаются определенными режимами термообработки. Возможные отклонения в химическом составе материала изделий, режимов их охлаждения и термообработки от заданных приводят к недопустимым отклонениям свойств изделий, требуют контроля всей продукции. Прямые методы определения механических свойств и структуры [1, 2] являются разрушающими и не могут быть использованы для определения качества изделий, предназначенных для эксплуатации. Современный уровень развития науки позволяет прогнозировать возможность использования магнитного метода для неразрушающего контроля режимов термообработки, химического, структурного и фазового состава изделий из ферромагнитных материалов, а современный уровень приборной реализации метода – осуществлять такой контроль в автоматическом режиме непосредственно в цехах и заводских лабораториях. Однако информация о современных возможностях магнитного структурного анализа рассредоточена по различным, иногда трудно доступным источникам. Это сдерживает более широкое применение метода в промышленности.

Целью настоящей работы является систематизация и обобщение основных принципов магнитного контроля структуры изделий из ферромагнитных сталей и чугунов и ознакомление с ними технологов и работников заводских лабораторий промышленных предприятий.

Ферромагнитные свойства конструкционных сталей и чугунов

Большинство железоуглеродистых сплавов, к которым относятся сталь и чугун, обладают ферромагнитными свойствами. При изменении магнитного поля H их намагниченность M изменяется нелинейным и неоднозначным образом – по петле гистерезиса [3] (рис. 1). Не существует точной аналитической формы записи функции $M(H)$ с учетом процессов формирования, роста, переориентации элементарных объемов намагничивания – магнитных доменов. Но в технических расчетах магнитного состояния ферромагнитных материалов возможно использование различных аппроксимирующих зависимостей [4–7]. Эксперименты [8] показали, что наиболее точно намагничивание конструкционных материалов описывают формулы [7], имеющие следующую компактную запись.

Формула для основной кривой намагничивания:

$$M_m = \chi_H \frac{H_{CS}^2 H_m}{H_m^2 + H_{CS}^2} + \frac{M_S}{\pi} \frac{H_m^2}{H_m^2 + kH_{CS}^2} \left[\sum_{n=0}^1 (-1)^n \arctg \frac{H_{CS} + (-1)^n H_m}{H_0} \right]. \quad (1)$$

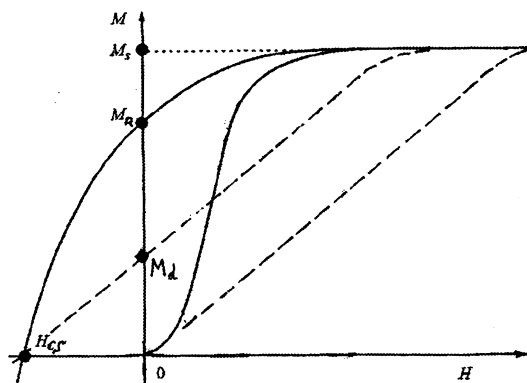


Рис. 1. Кривая намагничивания и часть нисходящей ветви петли магнитного гистерезиса ферромагнитного материала и тела (пунктир)

Формула для нисходящей ветви петли гистерезиса:

$$M = \chi_H \frac{H_{CS}^2 H}{H^2 + H_{CS}^2} + \frac{M_S}{\pi} \frac{H_m^2}{H_m^2 + k H_{CS}^2} \left[2 \arctg \frac{H_{CS} + H}{H_0} - \sum_{n=0}^1 \arctg \frac{H_{CS} + (-1)^n H_m}{H_0} \right], \quad (2)$$

где M – намагниченность материала в поле H на нисходящей ветви петли гистерезиса после намагничивания в поле H_m до намагниченности M_m ;

$$H_0 = \frac{H_{CS}}{\operatorname{tg} \left[\frac{\pi M_R}{2 M_S} \right]}; \quad k = \frac{M_S \arctg(2H_{CS} / H_0)}{\pi M_C - \chi_n \frac{H_{CS}}{2}} - 1; \quad (3)$$

H_{CS} , M_S , M_R – соответственно коэрцитивная сила, намагниченность насыщения и остаточная намагниченность материала при намагничивании по предельной петле гистерезиса; χ_n – начальная магнитная восприимчивость; M_C – намагниченность по основной кривой намагничивания при $H_m = H_{CS}$

Непосредственное применение формул (1)–(3) в технических расчетах затруднено использованием в них параметров χ_n и M_C отсутствующих в большинстве справочников по магнитным характеристикам сталей и чугунов. Попытка [9] уточнения предложенных в [7] формул не привела к достоверно обоснованным результатам и возможности использования в расчетах лишь основных магнитных параметров материала. Между тем, в [10] установлены приближенные эмпирические формулы, связывающие между собой магнитные характеристики конструкционных сталей. В [11] с использованием известных из литературы данных о магнитных характеристиках 200 разновидностей сталей, выпускаемых современной российской промышленностью, проверена применимость к ним эмпирических формул, выведенных в начале XX в. и связывающих эти характеристики друг с другом. Показано, что эти формулы справедливы и по отношению к современным материалам. Для максимальной магнитной проницаемости μ_m материалов при $H_{CS} \leq 6$ кА/м обоснованы следующие соотношения, связывающие ее с параметрами предельной петли гистерезиса:

$$\mu_m \approx (0,476 + 0,00568 H_{CS} (\text{Э})) \frac{B_R}{H_{CS}}, \quad (4)$$

$$H_{\mu_m} \approx (1,2 - 1,4) H_{CS}, \quad (5)$$

$$B_{\mu_m} \approx 1,3(0,476 + 0,00568 H_{CS} (\text{Э})) B_R, \quad (6)$$

где B_R – остаточная индукция материала при перемагничивании по предельной петле гистерезиса. Величину H_{CS} во внутренних скобках в (4), (6) по [10] следует подставлять в эрстедах, учитывая, что $1 \text{Э} \approx 79,8 \text{ А/м}$.

В [12, 13] на основании результатов экспериментальных исследований [7, 8] обосновано соотношение между χ_n и μ_m анализируемых материалов:

$$\chi_n \approx \frac{\mu_m}{3} - 1. \quad (7)$$

На основании (4)–(7) для вычисления χ_n и M_C в [12, 13] использованы выражения:

$$M_C \approx 0,67(0,476 + 0,0712 H_{CS} (\text{кА/м})) M_R, \quad (8)$$

$$\chi_n \approx 0,33(0,476 + 0,0712 H_{CS} (\text{кА/м})) M_R / H_{CS} - 1. \quad (9)$$

Во внутренних скобках в (8), (9) величину H_{CS} следует подставлять в кА/м.

По формулам (1)–(3), (8), (9) кривая намагничивания, предельная и частная петли магнитного гистерезиса конструкционных ферромагнитных материалов могут быть рассчитаны с достаточной для практики точностью по H_{CS} , M_S и M_R .

Измерение магнитных свойств конструкционных материалов

В соответствии с [14] измерения магнитных характеристик проводятся на кольцевых или прямолинейных образцах на аппаратуре (установках У5045, БУ-3, их аналогах [15–19]), удовлетворяющих требованиям [14]. Современная аппаратура (например, автоматизированные компьютеризированные комплексы «REMAGRAPH С-500» и «REMAGRAPH С-300» [20]) обеспечивают построение полного статического гистерезисного цикла магнитомягких и магнитотвердых материалов за 70 с. Измерения проводятся на образцах прямолинейной формы в замкнутой магнитной цепи пермеметра. Однако существующая аппаратура не применима в производственных условиях для контроля промышленных изделий из-за высокой стоимости, низкой производительности и необходимости

разрушения контролируемых изделий для изготовления образцов. Проведение таких измерений может быть рекомендовано при исследовании магнитных свойств новых ферромагнитных материалов. Для большинства сталей и чугунов такие исследования проведены, а их результаты обобщены.

Физическая основа магнитного структурного анализа

Физической основой магнитного структурного анализа является то [21], что как механические, так и магнитные свойства сталей и чугунов чувствительны к структурным превращениям, происходящим в них при различных термических обработках. К настоящему времени исследованы зависимости магнитных и механических свойств от структурного состояния, температуры нагрева при закалке и отпуске для большинства сталей и чугунов разных классов [22–29]. Установлено, что изменения структурного состояния сталей и чугунов приводят, как правило, к закономерному изменению их магнитных характеристик и механических свойств. Характерные зависимости изменения основных магнитных параметров углеродистых сталей от температуры отпуска приведены на рис. 2, а возможные диапазоны изменения основных магнитных параметров чугунов с различной структурой – в таблице. Наиболее структурочувствительным магнитным параметром конструкционных материалов является H_{CS} , которая определяется средней величиной сил, задерживающих необратимое смещение границ между доменами при перемагничивании. Факторами, задерживающими такое смещение, могут быть [3] неферромагнитные включения различной формы и дисперсности, напряжения, обусловленные дислокациями и другими причинами, градиенты напряжений, границы фаз, зерен и другие неоднородности и дефекты кристаллического строения. Закономерный характер установленных зависимостей позволил [27, 30, 31] обобщить их и получить аналитические взаимосвязи H_{CS} с температурой закалки и отпуска различных сталей с учетом содержания в них легирующих элементов. Полученные выражения позволяют, например, при известном химическом составе и температуре закалки аппроксимировать зависимости H_{CS} различных марок сталей от температуры отпуска.

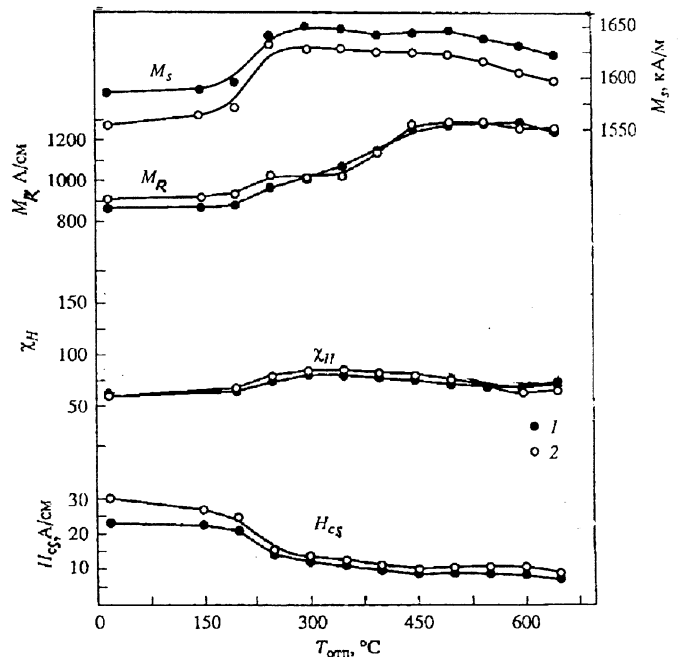


Рис. 2. Зависимости (по [28]) основных магнитных параметров H_{CS} , M_s , M_R и χ_H сталей 30 (1) и 45 (2), закаленных от температуры 850 °C, от температуры отпуска $T_{отп}$

Магнитные свойства чугунов с различной структурой по [25]

Тип чугуна	Тип металлической основы	H_{CS} , A/cm	μ_m	M_s , A/cm	M_R , A/cm
Белый чугун		10,4–12,8	180–200	10350	400–440
Серый	Ферритная	2,0–4,0	600–1500	14330	240–440
	Перлитная	5,6–10,4	200–450	13930	320–560
Высокопрочный	Ферритная	1,2–2,0	1600–2400	15130	240–480
	Перлитная	4,0–8,8	300–600	14730	400–640
Ковкий	Ферритная	1,2–2,0	1500–2300	14330	440–560
	Перлитная	4,0–8,8	300–800	13930	480–600

Коэрцитиметрические методы магнитного структурного анализа

Магнитный контроль качества термообработки и структуры стальных и чугунных изделий во многих случаях может быть основан на различии их H_{CS} . В промышленности для контроля качества изделий наибольшее распространение получили методы, основанные на косвенном определении H_{CS} . Методы магнитного контроля структурного состояния изделий из конструкционных ферромагнитных материалов по току размагничивания приставных магнитных устройств широко распространены

и хорошо освещены в литературе [21, 22, 25, 32, 33]. Их недостатком, кроме сильной зависимости результатов измерения от качества магнитного контакта преобразователя с контролируемой поверхностью, является низкая производительность.

Методы контроля изделий из конструкционных ферромагнитных материалов по полю от остаточной намагниченности после намагничивания изделий по методу «точечного полюса» [34] и остаточному магнитному потоку в изделии [35] используют особенности формирования остаточной намагниченности изделий при намагничивании в разомкнутой магнитной цепи.

Физическая причина «коэрцитивности» остаточной намагниченности

В.К. Аркадьевым [36], Р.И. Янусом [37] и впоследствии Ф. Ферстером [38] показано, что малогабаритное изделие, намагниченное до насыщения, после снятия внешнего поля сохраняет остаточную намагниченность тела M_d , которая меньше остаточной намагниченности материала изделия M_r . Во многих случаях можно считать

$$M_d \approx \frac{H_{CS}}{N}, \quad (10)$$

где N — размагничивающий фактор тела.

Таким образом, при постоянных размерах изделия ($N=\text{const}$) M_d определяется H_{CS} (см. рис. 1) и является структурочувствительным параметром. Это лежит в основе контроля свойств изделий по остаточной намагниченности.

На использовании этого явления основан один из распространенных методов контроля свойств изделий по результатам косвенного определения H_{CS} — метод «точечного полюса» [34]. Метод заключается в кратковременном контакте одного из полюсов постоянного магнита (электромагнита, соленоида с током) с контролируемой поверхностью и последующем измерении составляющих поля остаточной намагниченности (или его градиентов) над намагниченным участком. Коэрцитиметрический эффект метода обусловлен большим N намагниченного участка. Анализ теоретических и экспериментальных исследований по применению метода «точечного полюса» в магнитном структурном анализе и приборной реализации метода проведен в [34]. К последним достижениям метода отнесем результаты контроля твердости чугуновых отливок магнитным методом после полюсного намагничивания [39], проведенный [40] анализ влияния размеров датчиков на их чувствительность к H_{CS} материала изделия и анализ изменения чувствительности метода при измерении различных параметров поля на расстоянии от намагниченной поверхности. По результатам этого анализа предложен [41] способ снижения (более чем на порядок) влияния непостоянства зазора между датчиком и изделием на результаты контроля свойств изделия при одностороннем доступе к поверхности (рис. 3). Полученные результаты делают перспективным совершенствование базового прибора МС-1 [42] для структурного анализа крупногабаритных отливок при наличии окалины на поверхности непосредственно в цехах промышленных предприятий.

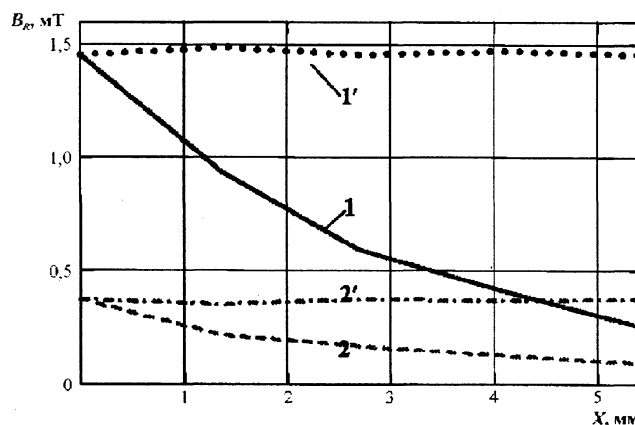


Рис. 3. Результаты применения традиционного [34] (1, 2) и предложенного [41] (1', 2') способов «точечного полюса» для контроля свойств стальных листов из стали 65Г (1, 1') и стали 3 (2, 2') при изменении зазора X между изделием и преобразователем

Формулы для расчета размагничивающего фактора изделий

Физической моделью многих промышленных изделий может быть сплошной или полый цилиндр. Анализ [43] исследований, проведенных многими авторами, позволил рекомендовать для расчета центральных коэффициентов размагничивания тел такой формы из материала с $\mu \gg 1$ при намагничивании параллельно (N) и ортогонально (N_1) образующей формулы:

$$N \approx h(2-h)\mathcal{E}(\lambda)k(\lambda) \quad \text{для } 0,2 \leq \lambda < \infty, 0 \leq h \leq 1 \quad (11)$$

и

$$N_1 \approx \frac{h}{2}[1-\mathcal{E}(\lambda)k(\lambda)] \quad \text{для } 0 \leq \lambda < \infty, 0 \leq h \leq 1, \quad (12)$$

где $\lambda = \frac{L}{D}$; $h = \frac{2\delta}{D}$; L – длина; D – наружный диаметр; δ – толщина стенки полого цилиндра (при $h=1$ получим формулы для сплошного цилиндра);

$$k(\lambda) = \frac{1 + 2,35 \ln(1 + 0,137\lambda)}{1 + 2,28 \ln(1 + 0,284\lambda)}; \quad (13)$$

$$\mathcal{E}(\lambda) = \frac{1}{1 - \lambda^2} \left[1 - \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \lambda^2}} \arccos \lambda \right] \text{ для } 0 \leq \lambda < 1; \quad (14)$$

$$\mathcal{E}(\lambda) = \frac{1}{\lambda^2 - 1} \left[\frac{\lambda}{\sqrt{\lambda^2 - 1}} \ln(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) - 1 \right] \text{ для } \lambda > 1. \quad (15)$$

Центральный коэффициент N размагничивания изделий сложной формы сечения рассчитывается как N сплошного цилиндра той же длины и площади сечения.

Особенности намагничивания ферромагнитного тела

Р.И. Янус [37] для аппроксимации изменения намагниченности на нисходящей ветви предельной петли гистерезиса ферромагнитного материала воспользовался формулой Фрелиха:

$$M = \frac{M_R M_S (H + H_{CS})}{M_S H_{CS} + M_R H}, \quad (H \geq -H_{CS}). \quad (16)$$

Решая (16) совместно с уравнением из [36], связывающим напряженности внутреннего H_i и внешнего H_e поля в намагничиваемом изделии

$$H_i = H_e - NM, \quad (17)$$

он, полагая в (17) $H_i = H$, получил при $H_e = 0$ следующее выражение для M_d :

$$M_d = \frac{M_S (H_{CS} + NM_R)}{2NM_R} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4M_R^2 NH_{CS}}{M_S (H_{CS} + NM_R)^2}} \right]. \quad (18)$$

Из (18) при $NM_R \gg H_{CS}$ следует (10). Формула (18) была экспериментально обоснована и проанализирована в [44]. В работе [45] дано ее развитие для всей предельной петли гистерезиса однородно намагничивающихся тел.

Однако реально достижимые в средствах магнитного неразрушающего контроля намагничивающие поля, как правило, недостаточны для намагничивания изделий в разомкнутой магнитной цепи до насыщения [46]. Для расчета M_d изделия, намагничиваемого в разомкнутой магнитной цепи не до технического насыщения по H_{CS} , M_S и M_R материала, размагничивающему фактору N изделия и напряженности H_e внешнего намагничивающего поля разработана [12] следующая методика. Величину H_m максимальной напряженности внутреннего поля в изделии при намагничивании полем H_e определяют совместным решением уравнений (1) и (17) с учетом (8), (9). При этом в (17) полагают $H_i = H_m$. По найденному значению H_m из совместного решения (2) и (17) при $H_e = 0$ определяют величину M_d . При этом в (17) полагают $H_i = H$.

Проведенный расчет позволил проанализировать основные закономерности изменения M_m и M_d изделий различных размеров из разных конструкционных материалов и физические ограничения магнитного метода контроля, обусловленные недостаточным промагничиванием изделий в разомкнутой магнитной цепи реально достижимым стационарным и импульсным магнитным полем [12, 13]. Установлено, в частности, что для изделий из материалов (см. рис. 2), H_{CS} которых с изменением контролируемого параметра (например, температуры отпуска) монотонно уменьшается, а M_R – возрастает, при намагничивании в разомкнутой магнитной цепи до состояния, далекого от магнитного насыщения, наблюдается повышение чувствительности M_d к контролируемым свойствам по сравнению с намагничиванием до насыщения. Наиболее эффективным такой режим контроля может оказаться для «коротких» (с большим N) изделий из материалов с $H_{CS} \leq 1$ кА/м. Использование намагничивания «коротких» изделий в открытой магнитной цепи требует высокой стабильности намагничивающего поля, так как чувствительность M_d к изменениям H_e в достижимых полях высокая.

Показано также, что чувствительность M_d к изменению размеров «коротких» изделий при намагничивании в открытой магнитной цепи возрастает с уменьшением H_e . Разработанный [47] метод контроля движущихся изделий по коэрцитивной силе наиболее эффективен для контроля достаточно «длинных»

изделий, когда их намагничивание в разомкнутой магнитной цепи происходит до состояния, близкого к магнитному насыщению.

Влияние предварительной намагниченности изделий на их остаточную намагниченность после намагничивания в открытой магнитной цепи также проанализировано [48] с использованием методики [12] расчета M_d изделия. Проведен анализ возможной погрешности σ измерения M_d изделия после намагничивания в открытой магнитной цепи в поле H_e . Установлены границы применения магнитного контроля свойств изделий при намагничивании в открытой магнитной цепи без предварительного размагничивания. Показано, что контроль с $\sigma=0$ для изделий материалов с $H_{CS} \leq 1$ кА/м при намагничивании в поле $H_e=40$ кА/м возможен при $\lambda \geq 8$, а при $H_e=60$ кА/м – при $\lambda \geq 5$, $\sigma=5\%$ при контроле в этих полях достигается при $\lambda \approx 6$ и 4. Для более коротких изделий применение магнитного метода рекомендовано для контроля ненамагниченных (сразу после литья или термообработки) либо размагниченных изделий.

Современные средства контроля изделий массового производства

Разработанные принципы магнитного неразрушающего контроля структуры и механических свойств изделий из конструкционных материалов заключаются [49] в использовании последовательно-поступательного свободного падения контролируемых изделий с заданной высоты сквозь область с намагничивающим полем заданной напряженности, формировании на пути движения изделий локальной области с размагничивающим полем заданной напряженности и областей, где действие намагничивающего и размагничивающего полей на контролируемые изделия скомпенсировано, измерении магнитного состояния изделия при его движении в этих областях и обработке результатов измерения по разработанным алгоритмам. В [50] показано, что, несмотря на действие на изделие при выходе из намагничивающей катушки тормозящей силы, многократно превосходящей силу тяжести, может быть выбрана высота падения изделий, при которой будет обеспечен их пролет сквозь намагничивающее поле без зависания.

Различные методики магнитного контроля изделий реализованы [35] созданием на пути движения изделий компактных областей с магнитным полем заданной напряженности. Разработанные принципы создания за областью с намагничивающим полем H_0 на пути движения изделия протяженной области с однородным магнитным полем заключаются [51] в использовании эффектов одинаковой скорости уменьшения магнитного поля на оси катушек, имеющих разные внутренний и внешний диаметры, на разных расстояниях от их торцов, создания однородных поля и градиента поля катушками Гельмгольца и резкого уменьшения поля за пределами «безмоментных» намагничивающих катушек.

Разработанные принципы обеспечили намагничивание изделий полем $H_e=40-50$ кА/м и создание заданных распределений (рис. 4) поля вдоль оси X движения изделий. Они реализованы в комплексе «Магнитных анализаторов качества стальных изделий МАКСИ», автоматически сортирующих изделия на годные и брак с производительностью до 2 изд./с.

В приборе «МАКСИ (АНБ-692)» индукционные преобразователи измеряют максимальный магнитный поток Φ_M в изделии при намагничивании и Φ_d в области, где намагничивающее поле скомпенсировано (зависимость $Y1$ на рис. 4). В приборе МАКСИ-2 изделия перед измерением Φ_d частично размагничивают (зависимость $Y2$). Приборы «МАКСИ-У (универсальный)» (рис. 5, а, зависимость $Y3$ на рис. 4) и «МАКСИ-Д (дизельный)» (рис. 5, б, зависимость $Y4$ на рис.4) обеспечивают создание на пути движения изделий заданных распределений магнитного поля и измерение магнитных параметров изделия при движении в нем. В них снижено влияние изменений размеров изделий на результаты контроля [47] и повышена чувствительность к поверхностным свойствам изделий.

Технические характеристики приборов МАКСИ, надежность контроля и сортировки, удобство включения в действующие циклы производства подтверждены результатами метрологической аттестации, внедрением на заводах России и Беларуси. Прибор МАКСИ-У, предназначенный для коэрцитиметрического контроля физико-механических свойств и автоматизированной сортировки деталей машиностроения, при производительности контроля до 2 изд./с в диапазоне изменения продольных

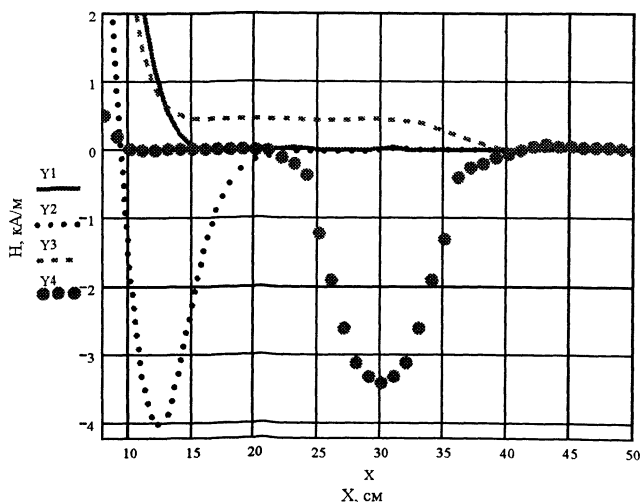


Рис. 4. Распределение магнитного поля вдоль оси движения изделий в зоне контроля приборов: Y1 – МАКСИ (АНБ-692); Y2 – МАКСИ-2; Y3 – МАКСИ-У; Y4 – МАКСИ-Д

размеров изделий 10–160 мм, поперечных – 3–40 мм аттестован ГОССТАНДАРТ в диапазоне измерения 0,01–99,9 мкВб с основной приведенной погрешностью не более 1,5%. При тех же размерах контролируемых изделий прибор МАКСИ-Д, предназначенный для неразрушающего магнитного контроля физико-механических свойств деталей дизельных двигателей, аттестован в диапазонах измерения 0–9,99 и 0–99,9 мкВб с относительной погрешностью 1,5%, а намагничивающий ток задан с погрешностью $\pm 0,5\%$. Это удовлетворяет и требованиям [14] к магнитоизмерительной аппаратуре.

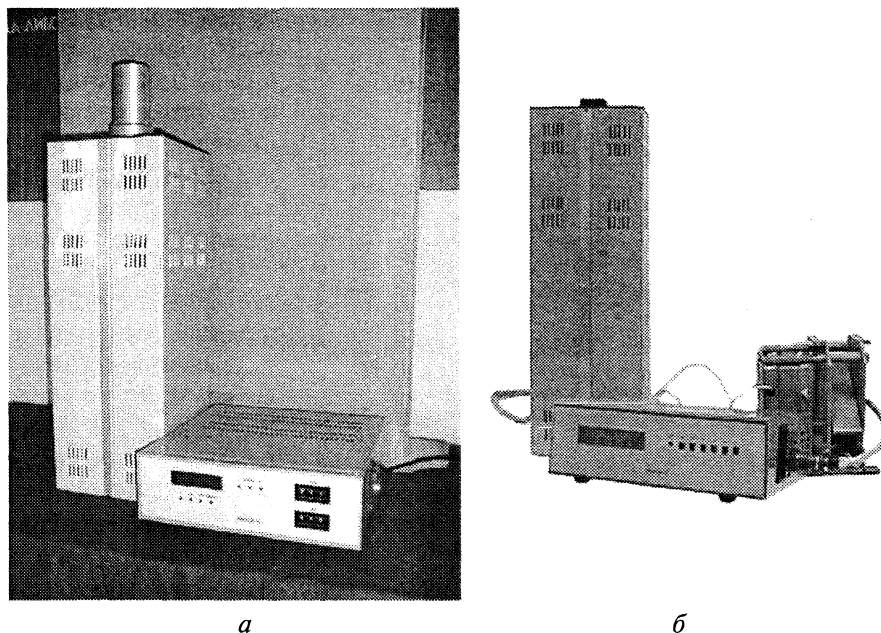


Рис. 5. Базовые модели приборов магнитного неразрушающего контроля изделий массового производства: МАКСИ-У (а) и МАКСИ-Д (б)

Особенности контроля качества изделий из легированных сталей

Коэрцитивная сила H_{CS} среднеуглеродистых легированных сталей и остаточный магнитный поток Φ_d в изделиях из них не однозначно связаны с температурой отпуска $T_{отп}$ изделий после закалки и с их механическими свойствами. Частичное размагничивание изделий из таких материалов и последующее измерение Φ_d в них позволяет, как правило, устранить неоднозначность связи Φ_d с механическими свойствами и температурой отпуска таких изделий. Но чувствительность зависимости Φ_d от механических свойств не достаточна для достоверного контроля. Для контроля качества термообработки изделий из легированных сталей предложено [49] намагничивать изделие в процессе движения, измерить Φ_d (Φ_1) после выхода изделия из области с намагничивающим полем, создать на пути движения изделия локальную область с постоянным размагничивающим полем, измерить второе значение остаточного магнитного потока Φ_d (Φ_2) в изделии после его выхода из области с размагничивающим полем и о свойствах изделия судить по отношению $F3$ результата этого измерения к разности результатов первого и второго измерений. Проведенные исследования показали, что наилучшую достоверность контроля обеспечивает размагничивающее поле 2 кА/м. Информационный параметр контроля $F3$ обеспечивает высокую чувствительность контроля к механическим свойствам изделий из среднеуглеродистых легированных сталей и независимость результатов контроля механических свойств изделий от изменений их размеров в пределах технологических допусков (рис. 6). Методика реализована прибором МАКСИ-У с модернизированным преобразователем прибора МАКСИ-Д. Применение разработанной методики (рис. 7) обеспечило высокий коэффициент корреляции $R=0,85$ в линейном уравнении регрессии между пределом прочности σ_B болтов крепления противовеса из стали 40ХН и показаниями прибора, гарантировало заданные механические свойства болтов, позволило вернуть в производство тысячи дорогостоящих ответственных болтов дизельных двигателей [49].

Контроль чугунных отливок массового производства по остаточному магнитному потоку в отливке после намагничивания в разомкнутой магнитной цепи реализован на ОАО «Минский завод отопительного оборудования» и ряде металлургических заводов России на базе наиболее совершенного

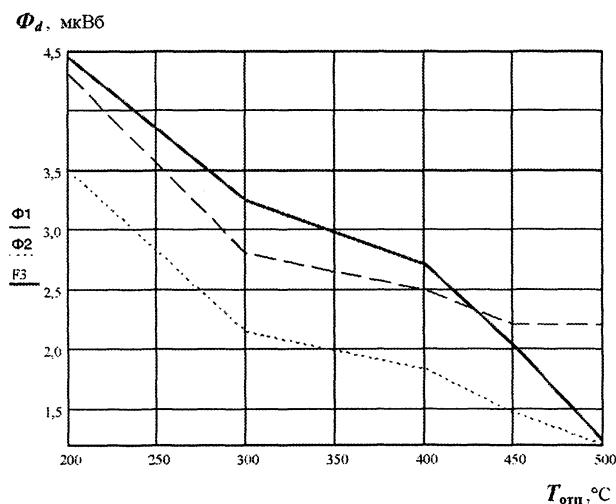


Рис. 6. Изменения информационных параметров приборов от температуры отпуска $T_{отп}$ болтов крепления противовеса №240-1005018 из стали 40ХН: Φ_1 (пунктирная линия) – МАКСИ (АНБ-692) и МАКСИ-У; Φ_2 (точки) – МАКСИ-2 и МАКСИ-Д; $F3$ (сплошная линия) – МАКСИ-У с модернизированным преобразователем прибора МАКСИ-Д

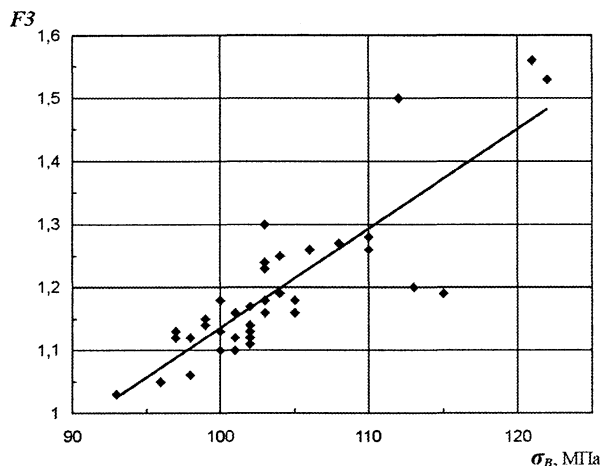


Рис. 7. Зависимость параметра F_3 от предела прочности σ_B промышленной партии болтов крепления противовеса №240-1005018 из стали 40ХН

рядном цифровом табло прибора. Результат измерения сравнивается с предварительно установленными пределами годности изделия по измеряемому параметру. По результату сравнения исполнительный механизм осуществляет сортировку изделий на годные и брак с производительностью до 2 изд./с.

Исследование влияния микроструктур отливок «ниппель 1 1/4''» стандартного размера на показания прибора МАКСИ-П и определение на этой основе порогов показаний прибора для разбраковки необточенных отливок ниппелей на группы по обрабатываемости проведено в [53]. Анализ относительного изменения остаточного магнитного потока в отливке при изменении ее размеров [52], проведенный на основе описанной выше методики с использованием аналитических выражений (1)–(3), (8), (9), (11), (17), позволил получить формулу для расчета нового порога Φ_2 разбраковки ниппелей по значению Φ_1 старого порога разбраковки с учетом изменения длины ниппелей:

$$\Phi_2 \approx \Phi_1 \frac{N_1^2 (1 - N_2)}{N_2^2 (1 - N_1)}, \quad (19)$$

где N_1 и N_2 – соответственно центральные коэффициенты размагничивания ниппеля старого размера и укороченного, вычисленные по формуле (11). По результатам расчета остаточного магнитного потока Φ_d в отливке, выполненного с учетом изменения N отливки при сохранении площади ее сечения, дана количественная рекомендация о снижении порога отбраковки отливок. Эксплуатация автоматизированной линии контроля и автоматической разбраковки по обрабатываемости необточенных отливок ниппелей из ковкого чугуна КЧ30-6 на базе приборов МАКСИ-П [52] подтвердила правильность сделанной рекомендации. Фактический экономический эффект от эксплуатации линии на ОАО «МЗОО» в 2007 г. превысил 864 млн. руб.

Выводы

1. Физической основой магнитного структурного анализа является чувствительность механических и магнитных свойств сталей и чугунов к структурным превращениям металла. К настоящему времени исследованы и систематизированы зависимости магнитных и механических свойств от структурного состояния, температуры нагрева при закалке и отпуске для большинства сталей и чугунов. Наиболее структурочувствительным магнитным параметром конструкционных материалов является коэрцитивная сила H_{CS} .

2. Разработанные аппроксимации изменения намагниченности материалов в магнитном поле и методики расчета позволяют с достаточной для практики точностью по H_{CS} , M_S , M_R материала изделий, их размерам и напряженности H_e намагничивающего поля рассчитать предельные и частные петли гистерезиса конструкционных сталей и чугунов и изделий из них, остаточную намагниченность M_d изделий, выбрать оптимальные режимы контроля.

3. Наибольшее распространение для решения различных задач магнитной структуроскопии промышленных изделий из конструкционных ферромагнитных материалов получили коэрцитивно чувствительные методы и приборы, основанные на контроле структурного состояния изделий по току размагничивания приставных магнитных устройств, по полю от остаточной намагниченности после намагничивания изделий по методу «точечного полюса» и остаточному магнитному потоку в изделии после намагничивания в разомкнутой магнитной цепи. Последние наиболее эффективны при контроле изделий массового производства.

прибора контроля изделий в движении – «Магнитного анализатора качества структуры изделий МАКСИ-П (портативного)» [52]. Принцип действия прибора заключается [35, 52] в бесконтактном намагничивании изделия в открытой магнитной цепи при его свободном падении сквозь область с намагничивающим полем постоянной напряженности H_e и измерении величины Φ_d остаточного магнитного потока в изделии при его движении сквозь область, где намагничивающее поле экранировано. Намагничивание осуществляется в стационарном поле двухполюсной магнитной системы напряженностью 46–60 кА/м. Намагничивающее поле ортогонально направлению движения изделия. При своем движении намагниченное изделие индуцирует в измерительном преобразователе специальной конструкции сигнал, вольт-секундная площадь полуволны которого измеряется (в мкВб) и индицируется на двухраз-

Литература

1. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. М.: Машиностроение, 1974. Т. 1, 2.
2. ГОСТ 3443-87. Методы определения структуры. М.: Изд-во стандартов, 1990.
3. Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука, 1971.
4. Городецкий П.Г. Обзор аналитических выражений кривых намагничивания и гистерезисных петель. Киев: Киевск. высш. инженер. радиотехн. училище войск ПВО страны, 1956.
5. Зацепин Н.Н. Аналитическая функция, описывающая ход симметричной петли магнитного гистерезиса // Вестн АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. 1973. № 4. С. 29–31.
6. Пономарев Ю.Ф. Гармонический анализ намагниченности ферромагнетиков, перемагничиваемых переменным полем с учетом магнитного гистерезиса. I. Способ описания петель магнитного гистерезиса // Дефектоскопия. 1985. № 8. С. 61–67.
7. Мельгуй М.А. Формулы для описания нелинейных и гистерезисных свойств ферромагнетиков // Дефектоскопия. 1987. № 11. С. 3–10.
8. Мельгуй М.А., Шидловская Э.А. Экспериментальная проверка аналитических выражений для нелинейных свойств ферромагнитных материалов // Дефектоскопия. 1987. № 11. С. 10–18.
9. Матюк В.Ф., Осипов А.А. Математическая модель петли магнитного гистерезиса // Докл. НАН Беларуси. 2004. Т.48. № 2. С. 52–55; Математическая модель намагничивания ферромагнетиков // Докл. НАН Беларуси. 2004. Т.48. № 5. С. 43–45.
10. Меськин В.С. Ферромагнитные сплавы. Л.; М. ОНТИ: НКТП, 1937.
11. Реутов Ю.Я., Лоскутов В.Е. Соотношение между магнитными характеристиками сталей // Контроль. Диагностика. 2008. № 4.
12. Сандомирский С.Г. Остаточная намагниченность ферромагнитного тела, намагниченного в открытой магнитной цепи // Дефектоскопия. 1997. № 8. С. 50–59.
13. Сандомирский С.Г. Изменение чувствительности магнитного метода контроля физико-механических свойств сталей при намагничивании изделий в разомкнутой магнитной цепи (ограничения возможностей метода) // Дефектоскопия. 1998. № 7. С. 72–81.
14. ГОСТ 8.377-80 Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик. М.: Изд-во стандартов, 1986.
15. Кифер И.И. Испытания ферромагнитных материалов. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1962.
16. Чернышев Е.Т., Чечурина Е.Н., Чернышева Н.Г., Студенцов Н.В. Магнитные измерения. М.: Изд-во стандартов, 1969.
17. Комаров Е.В., Покровский А.Д., Сергеев В.Г., Шихин А.Я. Испытания ферромагнитных материалов / Под ред. А.Я. Шихина. М.: Энергоатомиздат, 1984.
18. Антонов В.Г., Петров Л.М., Шелкин А.П. Средства измерения магнитных параметров материалов. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
19. Горкунов Э.С., Махов В.Н., Поволоцкая А.М. и др. Магнито-измерительный комплекс для магнитоструктурных исследований // Дефектоскопия. 1999. № 3. С. 78–84.
20. Steingroever E., Ross G. Magnetic Measuring Techniques. Booklet // Website: www.magnet-physik.de.
21. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Связь магнитных свойств со структурным состоянием вещества – физическая основа магнитного структурного анализа (обзор) // Дефектоскопия. 1981. № 8. С. 5–21; Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. М.: Наука, 1993.
22. Список трудов чл.-корр. АН СССР М.Н. Михеева // Дефектоскопия. 1991. №4. С. 6–23.
23. Морозова В.М., Михеев М.Н. Магнитные и электрические свойства сталей после различных термических обработок // Тр. Ин-та физики металлов УфАН СССР. Свердловск, 1965. Вып. 24. С. 3–25; Магнитные и электрические свойства закаленных и отпущенных сталей // Там же. С. 26–35.
24. Кузнецов И.А., Михеев М.Н. Магнитные и электрические свойства хромистых сталей в зависимости от структуры и механических свойств // Тр. Ин-та физики металлов УфАН СССР. Свердловск, 1959. Вып. 21. С. 228–252; Магнитные, электрические и механические свойства высокохромистых сталей после различных термических обработок // ФММ. 1959. Т.7. Вып. 4. С. 513–526.
25. Горкунов Э.С., Сомова В.М., Ничипурук А.П. Магнитные свойства и методы контроля структуры и прочностных характеристик чугунных изделий (обзор) // Дефектоскопия. 1994. №10. С. 54–82.
26. Бида Г.В., Царькова Т.Н., Ничипурук А.П. Магнитные свойства сталей после закалки и отпуска. I. Углеродистые стали // Дефектоскопия. 2001. № 2. С. 3–25; II. Низкотемпературные стали // Там же. С. 26–42; III. Высокохромистые стали // Там же. С. 43–56.
27. Бида Г.В. Неразрушающий контроль механических свойств стального проката (обзор). I. Контроль прочностных и пластических свойств // Дефектоскопия. 2005. №5. С. 39–53; II. Контроль вязких свойств // Там же. С. 54–76.
28. Бида Г.В., Ничипурук А.П. Магнитные свойства термообработанных сталей. Екатеринбург: УрО РАН, 2005.
29. Сандомирский С.Г. Возможности и ограничения магнитного контроля структуры чугунных отливок (обзор) // Литье и металлургия. 2006. № 2(38). Ч. 1. С. 118–123.
30. Костин В.Н., Царькова Т.П., Бида Г.В. Статистическое моделирование и анализ взаимосвязи химического состава и магнитных свойств конструкционных сталей после термической обработки // Дефектоскопия. 1994. № 10. С. 88–93; О возможности оценки химического состава сталей по их магнитным и электрическим свойствам в ферритоперлитном и мартенситном состояниях // Там же. 1998. № 5. С. 24–31.
31. Бида Г.В., Горкунов Э.С., Галлиев Р.М. Статистическая модель связи электромагнитных свойств и твердости углеродистых и низколегированных сталей с температурой отпуска при учете их химического состава. I. Коэрцитивная сила и твердость // Дефектоскопия. 1998. № 9. С. 50–58.
32. Горкунов Э.С., Захаров В. А. Коэрцитиметры с приставными магнитными устройствами (обзор) // Дефектоскопия. 1995. № 8. С. 69–88.
33. Мужикский В.Ф., Безлюдько Г.Я., Ремезов В.Б. Серия портативных приборов-структуроскопов, основанных на измерении величины коэрцитивной силы // Контроль. Диагностика. 2003. № 6. С. 6–14.
34. Сандомирский С.Г. Применение полюсного намагничивания в магнитном структурном анализе (обзор) // Дефектоскопия. 2006. № 9. С. 36–64.
35. Сандомирский С.Г. Магнитный контроль физико-механических свойств изделий массового производства в движении (обзор) // Дефектоскопия. 1996. №7. С. 24–46.

36. Аркадьев В.К. Электромагнитные процессы в металлах. М.; Л.: ОНТИ. 1934. Ч. 1.
37. Янус Р.И. Магнитная дефектоскопия. М.; Л.: Гостехиздат, 1946.
38. Forster F. Theoretische und experimentelle Grundlagen der elektromagnetischen Qualitätssortierung von Stahlteilen. IV. Das Reast-feldverfahren // Zeitschrift für Metallkunde. 1954. B. 45. N 4. P. 233–238.
39. Сандомирский С.Г., Цукерман В.Л., Писаренко Л.З. Возможности и результаты контроля твердости чугуновых отливок магнитным методом после полюсного намагничивания // Литье и металлургия. 2007. № 3. С. 106–110.
40. Сандомирский С.Г. Анализ чувствительности поле- и градиентометрических датчиков к коэрцитивной силе материала изделия с плоской поверхностью после полюсного намагничивания // Контроль. Диагностика. 2008. №5.
41. Сандомирский С.Г. Пат. РФ № 9627, 2007. Способ контроля физико-механических свойств ферромагнитного изделия, связанных с его магнитными свойствами.
42. Сандомирский С.Г., Цукерман В.Л., Линник И.И., Сандомирская Е.Г. Универсальный магнитный сортировщик и его применение для решения задач неразрушающего контроля // Контроль. Диагностика. 2004. № 8. С. 27–31.
43. Сандомирский С.Г. Анализ условий намагничивания в разомкнутой магнитной цепи промышленных изделий в форме полых цилиндров из материала с высокой магнитной проницаемостью // Материалы III Российской НТК «Разрушение, контроль и диагностика материалов и конструкций» (электронный ресурс). Екатеринбург, ИМАШ УрО РАН, 2007. С. 24; Анализ формул для расчета центрального коэффициента размагничивания полых цилиндров из материала с высокой магнитной проницаемостью при намагничивании ортогонально образующей // Электротехника. 2008. № 3. С. 45–51.
44. Сандомирский С.Г. Чувствительность остаточной намагниченности ферромагнитных изделий к магнитным характеристикам их материалов и геометрическим параметрам // Дефектоскопия. 1990. № 12. С. 53–59.
45. Сандомирский С.Г., Горбаш В.Г., Делендик М.Н., Сандомирская Е.Г. Аналитическое описание предельной петли гистерезиса ферромагнитного тела // Дефектоскопия. 1996. №7. С. 17–24.
46. Сандомирский С.Г. Выбор величины намагничивающего поля при магнитоструктурном анализе ферромагнитных изделий // Дефектоскопия. 1991. №7. С. 42–48.
47. Сандомирский С.Г. Анализ метода контроля движущихся ферромагнитных изделий по коэрцитивной силе // Дефектоскопия. 1991. №6. С. 27–34.
48. Сандомирский С.Г., Сандомирская Е.Г. Влияние магнитной предыстории изделия на результат контроля его физико-механических свойств магнитным методом при намагничивании в разомкнутой магнитной цепи (ограничения возможностей метода). 1. Модельный эксперимент // Дефектоскопия. 2004. № 6. С. 63–71; 2. Аналитическое моделирование // Там же. С. 72–79.
49. Сандомирский С.Г., Синякович Э.Б. Использование последовательно-поступательного и роторно-конвейерного движения массовых партий ответственных изделий машиностроения для магнитного контроля их качества // Механика машин, механизмов и материалов. 2008. № 2. С. 70–75.
50. Сандомирский С.Г. Движение ферромагнитного изделия сквозь область с намагничивающим полем средств магнитного контроля изделий массового производства // Тез. докл. Республ. науч.-техн. семинара «Импульсный магнитный метод контроля механических свойств сталей». Мн., 1991. С. 41–44.
51. Сандомирский С.Г., Сандомирская Е.Г. Создание намагничивающего поля заданной пространственной конфигурации в средствах магнитного структурного анализа стальных и чугуновых изделий машиностроения // Материалы 2-й Междунар. НТК «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов». Могилев, 2006. С. 195–197.
52. Сандомирский С.Г., Вершинин В.А. Корректировка браковочных пределов автоматической линии разбраковки по обрабатываемости необточенных отливок nipples из ковкого чугуна КЧ30-6 при изменении их размеров // Литье и металлургия. 2008. № 1. С. 116–120.
53. Писаренко Л.З., Сандомирский С.Г., Лукашевич С.Ф. Количественный анализ взаимосвязи микроструктуры и магнитных свойств изделий типа «ниппель 1¼» из ковкого чугуна КЧ30-6 // Дефектоскопия. 2002. № 4. С. 18–24.