

The results of modern investigations and developments by magnetic control of articles structures by means of "point pole" are given.

С. Г. САНДОМИРСКИЙ, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси

УДК 620.179.14

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЛОКАЛЬНОГО МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ СТРУКТУРЫ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК

Введение. На металлургических и машиностроительных предприятиях выпускаются массовые партии чугуновых отливок. Отклонения в химическом составе отливок, режимах их охлаждения и термообработки приводят к недопустимым изменениям структуры отливок, требуют контроля всей продукции. Прямые методы определения структуры являются разрушающими и не могут быть использованы для контроля изделий, предназначенных для эксплуатации. Основой магнитного структурного анализа чугунов служит различие магнитных характеристик (намагниченности M_S насыщения, остаточной намагниченности M_R , коэрцитивной силы H_C и максимальной магнитной проницаемости μ_m) их структурных составляющих (см. таблицу) [1, 2]. Параметром, наиболее чувствительным к структуре чугунов, является H_C (см. таблицу).

Анализ [3, 4] показал, что разделение чугуновых отливок с различной структурой друг от друга по результату измерения H_C или определяемой ею остаточной намагниченностью M_d отливок может быть рекомендовано для:

- выделения белого чугуна от чугунов всех других типов, в том числе для контроля качества отжига белого на ковкий чугун, контроля наличия отбела на поверхности отливок из серого чугуна;

- разбраковки друг от друга перлитного и ферритного чугунов всех типов;
- контроля формы графитовых включений в чугуне при постоянной структуре металлической матрицы.

Одним из современных коэрцитиметрических методов магнитного структурного анализа, рекомендованных для контроля структуры локальных участков крупногабаритных отливок, является метод «точечного полюса» и реализующие его приборы «Сортировщик магнитный МС» (рис. 1) [5–7]. Но они обладают и недостатком – зависимостью результатов контроля от влияния на его результаты

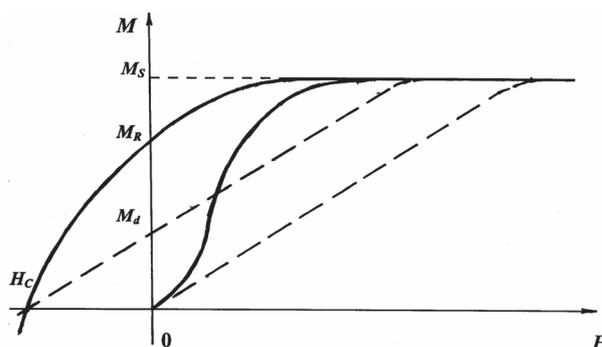


Рис.1 Кривая намагничивания и часть нисходящей ветви петли магнитного гистерезиса ферромагнитного материала и тела (пунктир)

Магнитные свойства чугунов с различной структурой

Тип чугуна	Тип металлической основы	H_C , кА/м	μ_m	M_S , кА/м	M_R , кА/м
Белый чугун		1,04–1,28	180–200	1035	400–440
Серый чугун	Ферритная	0,2–0,4	600–1500	1433	240–440
	Перлитная	0,56–1,06	200–450	1393	320–560
Высокопрочный чугун	Ферритная	0,12–0,2	1600–2400	1513	240–480
	Перлитная	0,4–0,88	300–600	1473	400–640
Ковкий чугун	Ферритная	0,12–0,2	1500–2300	1433	440–560
	Перлитная	0,4–0,88	300–800	1393	480–600

непостоянства зазора между преобразователем и изделием.

Цель работы – анализ исследований и разработок по магнитному контролю структуры изделий методом «точечного полюса», снижающих влияние зазора между изделием и преобразователем на результаты контроля.

Причина «коэрцитивности» остаточной намагниченности изделий

Изделие с большим размагничивающим фактором N после намагничивания до насыщения сохраняет остаточную намагниченность M_d , которая меньше M_R материала изделия (рис. 2). Во многих случаях можно считать [8]

$$M_d \approx \frac{H_C}{N}. \quad (1)$$

При постоянных размерах изделия ($N = \text{const}$) M_d определяется H_C и является структурно чувствительным параметром.

На использовании этого явления основан и метод «точечного полюса» [5], заключающийся в кратковременном контакте полюса 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. По экспериментальным оценкам [9], он достигает 0,3. Анализ теоретических и экспериментальных исследований по применению метода «точечного полюса» в магнитном структурном анализе и приборной реализации метода проведен в [5].

Последние достижения метода основаны на анализе изменения индукции от изделия при намагничивании, анализе влияния размеров датчиков на их чувствительность к H_C материала изделия и анализе изменения чувствительности метода при измерении различных параметров поля на расстоя-

нии от намагниченной поверхности [10, 11]. Установлено, что вблизи полюсно намагниченной поверхности чувствительность нормальной составляющей ∇H_{\perp} градиента поля остаточной намагниченности к H_C материала изделий выше, чем чувствительность к H_C нормальной составляющей H_{\perp} поля остаточной намагниченности. С увеличением расстояния до поверхности и размеров преобразователей чувствительности этих параметров к H_C материала изделий резко уменьшаются. Показано [10], что зависимость сигналов преобразователей от расстояния z до поверхности можно интерполировать функцией

$$H(z) = H_0(1 + kz^n)^{-1}, \quad (2)$$

где H_0 – параметр ($H_{\perp}(0)$ или $\nabla H_{\perp}(0)$) поля остаточной намагниченности изделия после его намагничивания без зазора; k и n – постоянные коэффициенты.

В практически важном интервале изменения z изменения сигналов преобразователей можно интерполировать функцией (2) достаточно точно.

При анализе влияния зазора при намагничивании рассмотрен [11] полюс магнита диаметром D , расположенный на расстоянии Z от полупространства из материала с магнитной проницаемостью μ . Для нормальной составляющей индукции B_{\perp} под полюсом получено:

$$B_{\perp} = B_{\infty} \left(1 + \frac{\mu - 1}{\mu + 1} \gamma \right), \quad (3)$$

$$\gamma = 1 - \frac{2z}{\sqrt{1 + 4z^2}},$$

где B_{∞} – индукция B_{\perp} при бесконечном удалении полюса от полупространства; $z = Z/D$.

Зависимость (3) получена в [11] с учетом влияния отражения только одного полюса без учета подмагничивающего влияния поверхности на намагниченность постоянного магнита. Сделанные допущения упрощают понимание физического смысла разрабатываемого метода и не существенны для достижения цели работы.

Магнитная проницаемость μ чугунов является структурно чувствительным параметром. Но для этих материалов $\mu \gg 1$. С учетом этого из (3) получим:

$$B_{\perp} \approx B_{\infty}(1 + \gamma). \quad (4)$$

Относительная разность β результата вычисления индукции B_{\perp} под полюсом магнита по формулам (4) и (3) равна:



Рис. 2 Внешний вид магнитного сортировщика МС

$$\beta = 1 - \frac{1 + \frac{\mu - 1}{\mu + 1} \gamma}{1 + \gamma}. \quad (5)$$

Результаты расчета по (5) влияния z на β для различных μ материала полупространства показали, что даже на поверхности полупространства ($z = 0$) при $\mu = 100$ влияние изменения μ на индукцию B_{\perp} поля под магнитом не превышает 1%. С увеличением z и μ это влияние становится еще слабее. В то же время величина B_{\perp} с увеличением z уменьшается существенно. Это является предпосылкой использования результата измерения B_{\perp} для определения расстояния, на которое сближаются магнит (электромагнит, соленоид с током) и поверхность изделия при намагничивании методом «точечного полюса».

Результаты проведенного анализа использованы для разработки **способа отстройки от влияния зазора** на результаты магнитного структурного анализа при полюсном намагничивании изделия [12], сущность которого в следующем.

Параметр H поля остаточной намагниченности отливки после намагничивания «точечным полюсом» пропорционален H_C материала локального участка отливки и, следовательно, его структуре. В качестве H могут быть использованы результаты измерения напряженности различных составляющих поля остаточной намагниченности с применением магниторезисторов, датчиков Холла, феррозондов, индукционных катушек, результаты измерения градиентов составляющих поля или другие параметры. В зависимости от расстояния (δ или Z), на которое сближаются преобразователь и отливка при контроле, параметр H монотонно изменяется от максимального значения H_0 (при δ или $Z = 0$) до нуля (при δ или $Z \rightarrow \infty$). Характер этой зависимости индивидуален для каждого изделия и зависит от параметров изделия, магнита и измерительного датчика. Но для каждого изделия зависимость $H(z)$ или $H(\delta)$ с достаточной для практики точностью можно интерполировать формулой (2).

Максимальная индукция B под магнитом (электромагнитом, соленоидом с током) при намагничивании контролируемого участка в зависимости от расстояния (δ или Z), на которое сближаются преобразователь и изделие при намагничивании, монотонно изменяется от значения B_m (при δ или $Z = 0$) до значения B_{∞} , близкого $B_m/2$ (при δ или $Z \rightarrow \infty$). Эта зависимость имеет общий характер для изделий из материалов с высокой μ и зависит практически только от параметров магнита. Для каждого магнита зависимость $B(Z)$ или $B(\delta)$ с до-

статочной точностью может быть интерполирована функцией вида

$$B(Z) = (B_m - B_{\infty}) \left(\frac{1}{1 + lZ^m} + \frac{B_{\infty}}{B_m - B_{\infty}} \right), \quad (6)$$

где l и m – постоянные коэффициенты.

Функция (6) интерполирует зависимость (3) практически точно.

В соответствии с [12] для определения коэффициентов в зависимостях (2) и (6) сигналов датчиков от расстояния до поверхности предложено использовать априорные результаты измерения сигналов датчиков при намагничивании «образцового» (любого годного из контролируемых) изделия. Перед проведением контроля на «образцовом» изделии определяют:

- H_0, H_1 и H_2 – значения параметра поля остаточной намагниченности при нулевом зазоре и с зазорами δ_1 и δ_2 соответственно ($\delta_1 < \delta_2$);
- B_0, B_1, B_2 и B_{∞} – значения максимальной индукции при намагничивании изделия при нулевом зазоре, с зазорами δ_1 и δ_2 и на удалении от изделия.

После этого на контролируемом изделии при произвольном зазоре δ измеряют индукцию B под полюсом постоянного магнита при намагничивании и параметр H поля от остаточной намагниченности. Результирующий параметр $H_{\text{рез}}$ поля остаточной намагниченности определяют по выражению:

$$H_{\text{рез}} = H \left[1 + \left(\frac{H_0}{H_1} - 1 \right) G^{\frac{n}{m}} \right], \quad (7)$$

где $G = \frac{(B_0 - B)(B_1 - B_{\infty})}{(B_0 - B_1)(B - B_{\infty})}$; $n = \ln \frac{H_0/H_2 - 1}{H_0/H_1 - 1}$; $m = \ln \frac{(B_0 - B_2)(B_1 - B_{\infty})}{(B_0 - B_1)(B_2 - B_{\infty})}$.

Расстояние δ_2 при измерении B_2, H_2 на образцовом изделии целесообразно выбрать близким к максимально возможному зазору между преобразователем и изделием при контроле, а расстояние δ_1 при измерении B_1, H_1 на образцовом изделии – примерно равным $\delta_2/2$. Такой выбор расстояний δ_1, δ_2 обеспечит при одинаковой погрешности измерения параметров B и H при проведении контроля минимальную погрешность вычисления параметра $H_{\text{рез}}$. Перед проведением повторных измерений «образцовое» изделие следует размагничивать.

Причина эффективности [12] в том, что измерение параметров $B_{\infty}, B_0, H_0, B_1, H_1, B_2, H_2$ на образцовом изделии позволяет определить коэффициенты k, n, l, m в (2) и (6). Тогда результаты измерения B и H на контролируемом изделии с произ-

вольным зазором δ между преобразователем и изделием позволяют по (7) вычислить параметр $H_{рез}$, который практически не зависит от δ и равен H_0 .

Результаты реализации известного (по прибору МС) и разработанного (по [12]) способов для контроля свойств листов из различных сталей при изменении δ между изделием и преобразователем приведены на рис. 3. Листы намагничивались магнитом (14×14×16 мм) из феррита стронция. Для измерения индукции под магнитом при намагничивании и остаточной индукции от изделий (рис. 3, а) использован датчик Холла прибора Щ4311 с толщиной щупа 1 мм. При измерении поля остаточной намагниченности листов (рис. 3, б) использован феррозонд-градиентометр (длина 12 мм) прибора «Магнитный сортировщик МС» [6]. Результаты, приведенные на рисунке, показывают, что способ [12] по сравнению с известным обеспечивает 20–50-кратное снижение влияния непостоянства δ между преобразователем и изделием при намагничивании и измерении на результаты контроля свойств изделия.

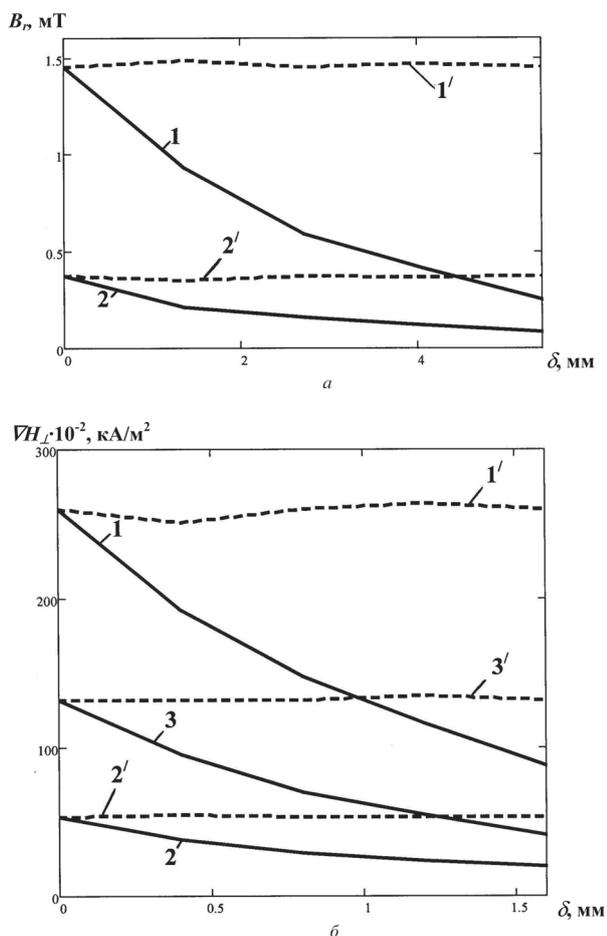


Рис. 3. Результаты реализации известного (1, 2, 3) и разработанного (1', 2', 3') способов для контроля свойств стальных листов из стали 65 Г, (1, 1'), стали 3 (2, 2') и стали 40Х (3, 3') при измерении поля остаточной намагниченности датчиком Холла (а) и феррозондом-градиентометром (б)

Устройства для реализации способа [12] приведены на рис. 4. Устройство [13] состоит из корпуса 1, верхняя часть которого выполнена из магнитомягкого, а нижняя – из немагнитного материалов, пружины 2, штока 3, выполненного с возможностью перемещения из одной части корпуса в другую, соединенного с корпусом при помощи пружины, постоянного магнита 4, закрепленного на штоке, феррозонда-градиентометра 5, закрепленного на рычаге 6 (рис. 4, б) или расположенного в нижней части корпуса (рис. 4, а). Феррозонд подключен к генератору 7 (рис. 4, в) и блоку 8 обработки сигнала. Магниточувствительный преобразователь 9 (датчик Холла, магниторезистор, индукционная катушка с интегратором) расположен на торце нижней части корпуса. Блок 10 памяти, входы которого подключены к блоку обработки сигнала и магниточувствительного преобразователя, подключен к блоку 11 вычисления, соединенному с дисплеем 12. Концентратор 13 из магнитомягкого материала увеличивает напряженность поля у поверхности изделия 14 при намагничивании. Позициями 5' и 6' (рис. 4, б) обозначены феррозонд и рычаг в положении, которое они занимают при намагничивании изделия, на расстояние δ до которого может приближаться при контроле торец корпуса устройства.

В процессе контроля корпус немагнитной частью устанавливается вертикально на поверхность не намагниченного изделия с произвольным зазором δ . Нажатием на шток постоянный магнит приводится в соприкосновение с внутренней поверхностью немагнитной части корпуса в ее торце и локально намагничивает изделие. При этом рычаг с закрепленным на нем феррозондом отодвигается в сторону (рис. 4, б). Максимальная индукция B от изделия при намагничивании измеряется магниточувствительным преобразователем. Результат измерения B запоминается блоком памяти. После этого нагрузка со штока снимается и постоянный магнит под действием пружины возвращается в исходное положение в магнитомягкую часть корпуса, служащую магнитным экраном. Рычаг с закрепленным на нем феррозондом возвращается в исходное положение на оси корпуса. Феррозонд оказывается под действием только поля остаточной намагниченности изделия. Результат измерения ∇H градиента поля остаточной намагниченности изделия запоминается блоком памяти. Блок вычисления по измеренным B и ∇H вычисляет параметр $H_{рез}$ по (7). Результат вычисления $H_{рез}$ индицируется на дисплее и используется для сортировки изделий по физико-механическим свойствам и структуре.

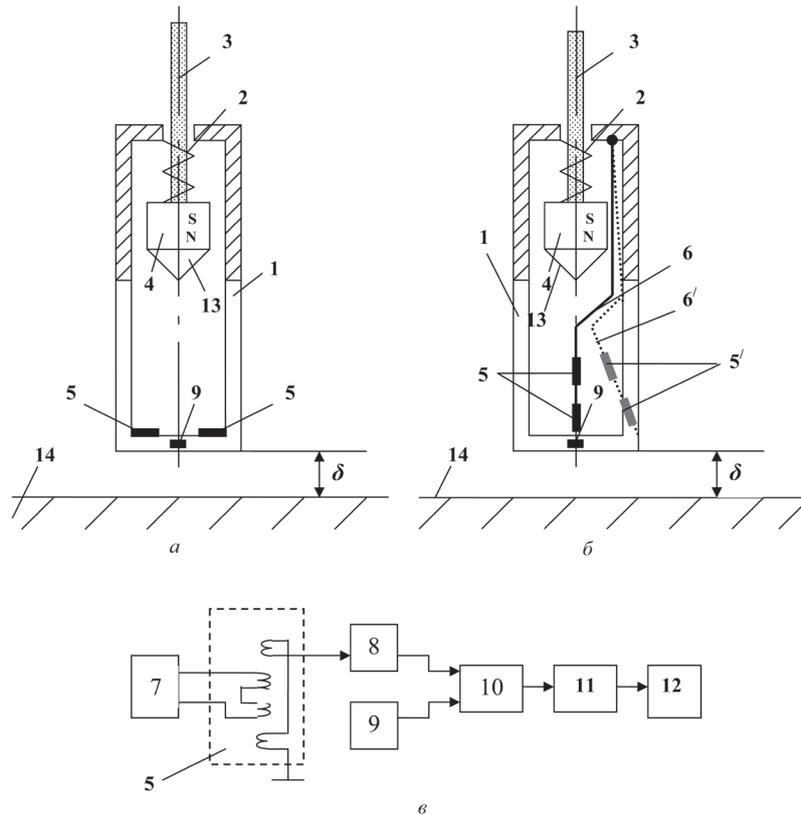


Рис. 4. Функциональные (а, б) и электрическая (в) схемы устройств для реализации способа [12]

Представляется целесообразным использование для контроля структуры чугунных отливок и способа [14], задачей которого являлось повышение достоверности магнитного контроля температуры отпуска изделия из среднеуглеродистой стали.

Способ включает намагничивание контролируемого участка изделия до технического насыщения аксиально симметричным магнитным полем, направленным нормально к поверхности этого участка, измерение после окончания релаксационных процессов в изделии над этим участком параметра H_0 поля остаточной намагниченности, воздействие на тот же участок изделия аксиально симметричным магнитным полем противоположного направления, меньшим намагничивающего, измерение параметра H поля остаточной намагниченности над контролируемым участком изделия и определение отношения $F = \frac{H}{H_0 - H}$. Напряженность размагничивающего поля устанавливают такой, чтобы на изделии с максимальной H_C из числа контролируемых, подвергнутом намагничиванию и размагничиванию аналогично контролируемому изделию, выполнялось условие $0,75 \leq \frac{H}{H_0} \leq 0,85$.

Достоверность контроля структуры чугунных отливок способом [14] будет повышена благодаря

существенному (более чем на порядок) снижению влияния изменений зазора между преобразователем и поверхностью отливок на результаты контроля.

Результаты применения известных и предложенного способов в условиях непостоянства зазора X между преобразователем и поверхностью изделия приведены на рис. 5. Намагничивание, размагничивание образца и измерение напряженности H поля остаточной намагниченности осуществля-

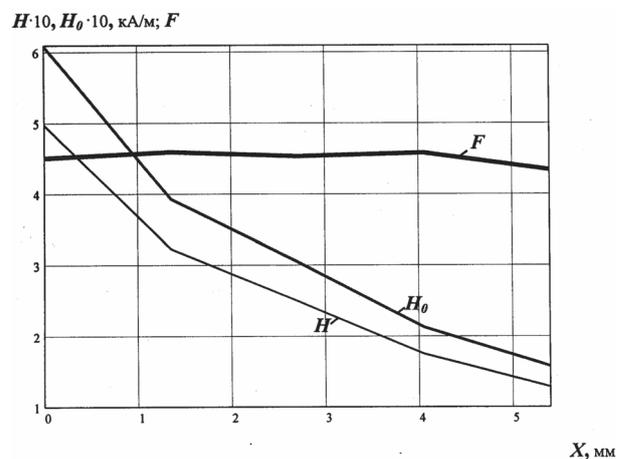


Рис. 5. Сопоставление влияния зазора X между контролируемой поверхностью листа из стали 65Г на информационные параметры известных и предложенного способов

лось через немагнитные прокладки, толщина которых была кратна 1,35 мм. Из рисунка видно, что в исследованном диапазоне изменения зазора X от 0 до 5,4 мм информационные параметры H_0 и H известных способов изменяются более чем в 3 раза. Контроль структуры изделий в этих условиях невозможен. При этих же условиях информационный параметр F способа [14] изменяется в пределах $\pm 4\%$. Это делает реальным контроль структуры отливок в производственных условиях с высокой достоверностью.

Физическое объяснение эффективности способа [14] при непостоянстве зазора X между преобразователем и изделием заключается в следующем. При выбранной в соответствии с [14] напряженностью H_p размагничивающего поля характер зависимости $H(X)$ практически не отличается от характера зависимости $H_0(X)$. Поэтому информационный параметр F способа [14], равный отношению

$H(X)$ к разности $H_0(X) - H(X)$, практически не изменяется с изменением зазора X между преобразователем и изделием.

Выводы

С использованием результатов расчета пространственного распределения поля от намагничивающихся и намагниченных изделий разработаны методики, обеспечивающие повышение достоверности контроля структуры изделий по результатам их полюсного намагничивания. Методики используют результаты априорного измерения остаточной индукции B_d и индукции при намагничивании на «образцовом» изделии, а также частичное размагничивание намагниченного изделия после измерения его B_d и повторное измерение B_d . Повышение достоверности обеспечивается за счет снижения в 20–50 раз влияния непостоянства зазора между преобразователем и изделием на результаты контроля свойств изделия.

Литература

1. Вонсовский С. В., Михеев М. Н. Магнитный структурный анализ // Заводская лаборатория. 1957. № 10. С. 1221–1226.
2. 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.
3. Сандомирский С. Г. Возможности и ограничения магнитного контроля структуры чугунных отливок (обзор) // Литье и металлургия. 2006. № 2(38). Ч. 1. С. 118–123.
4. Сандомирский С. Г. Магнитный контроль структуры стальных и чугунных изделий. Современное состояние (обзор) // Литье и металлургия. 2008. № 2. С. 33–42.
5. Сандомирский С. Г. Применение полюсного намагничивания в магнитном структурном анализе (обзор) // Дефектоскопия. 2006. № 9. С. 36–64.
6. 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.
7. Сандомирский С. Г., Цукерман В. Л., Писаренко Л. З. Возможности и результаты контроля твердости чугунных отливок магнитным методом после полюсного намагничивания // Литье и металлургия. 2007. № 3. С. 106–110.
8. Аркадьев В. К. Электромагнитные процессы в металлах. Ч. 1. М.–Л.: ОНТИ, 1934.
9. Федорищева Э. Э., Фридман Л. А., Табачник В. П., Чернова Г. С. Нормальная составляющая остаточного магнитного поля над поверхностью массивного тела // Дефектоскопия. 1982. № 2. С. 23–29.
10. Сандомирский С. Г. Анализ чувствительности поле- и градиентометрических датчиков к коэрцитивной силе материала изделия с плоской поверхностью после полюсного намагничивания // Контроль. Диагностика. 2008. № 5. С. 31–41.
11. Сандомирский С. Г. Полюсное намагничивание в магнитном структурном анализе: отстройка от влияния зазора при одностороннем доступе к объекту контроля // В мире неразрушающего контроля. 2011. № 1. С. 38–43.
12. Сандомирский С. Г. Способ контроля физико-механических свойств ферромагнитного изделия, связанных с его магнитными свойствами: Пат. Республики Беларусь № 9627, 2007.
13. Сандомирский С. Г. Устройство для контроля структуры изделий из ферромагнитных материалов, связанной с их магнитными свойствами: Пат. Республики Беларусь № 9735, 2007.
14. Сандомирский С. Г. Способ магнитного контроля температуры отпуска изделия из среднеуглеродистой стали, подвергнутого предварительной закалке: Пат. Республики Беларусь № 13913, 2011.