

Главный редактор

Мигун Н.П.

Редакционная коллегия:

Боровский В.В.
Венгринович В.Л.
Войцехович Л.Н. (*заместитель главного редактора*)
Высоцкий М.С.
Горбаш В.Г.
Жагора Н.А.
Зуйков И.Е.
Ивлев С.А.
Кулагин В.Н.
Линевич С.Я.
Лухвич А.А.
Матюк В.Ф.
Мелешко А.Л.
Пантелеенко Ф.И.
Попоудина С.А.
Рудницкий В.А.
Сергеев С.С.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА

№ 2, 2011

*Научно-практический журнал
(Электронная версия журнала
на сайте *science.by*)*

Учредитель

*Белорусская ассоциация
неразрушающего контроля
и технической диагностики,
республиканское общественное
объединение*

Соучредители

*Институт прикладной физики
НАН Беларуси,
государственное научное учреждение*

*«Диатех»,
республиканское научно-производственное
унитарное предприятие*

Белорусский электронный журнал «Наука»

Серия
Неразрушающий контроль и диагностика
Электронная версия журнала на сайте *science.by*

Электронный научно-практический журнал

Издатели

Государственное научное учреждение
«Институт прикладной физики НАН Беларуси»

Республиканское научно-производственное унитарное предприятие
«Диатех»

Подписано в печать 20.06.2011.
Формат 60x84 1/8.
Бумага офсетная. Гарнитура Cambria.
Усл. печ. л. 9,30.
Тираж печатной версии 50 экз.

Печать цифровая.
Государственное предприятие «Диатех»,
220072 г. Минск, ул. Академическая, 16.

Тексты публикуются в авторской версии без редакционных изменений

© Государственное научное учреждение
«Институт прикладной физики НАН Беларуси», 2011

© Республиканское научно-производственное
унитарное предприятие «Диатех», 2011

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КРИВОЙ
НАМАГНИЧИВАНИЯ И ПЕТЕЛЬ МАГНИТНОГО
ГИСТЕРЕЗИСА. Часть I. Анализ моделей**
*The mathematical models of the magnetization curve and the
magnetic hysteresis loops. Part 1. Analysis of models*

Матюк В.Ф., Осипов А.А.
Matyuk V.F., Osipov A.A.

Проанализированы наиболее используемые аналитические выражения для описания основной кривой намагничивания и петель магнитного гистерезиса, особое внимание уделено рассмотрению математических моделей с использованием арктангенсовых функций. Даны практические рекомендации по возможностям и ограничениям применения рассмотренных моделей.

The most used analytical formulas for the elementary magnetization curve and the magnetic hysteresis loops are analyzed, the mathematical models using arc-tangent functions is detailed discussed. Practical recommendations for possibilities and limitations of discussed models applications are given.

Введение.

Намагничивание и перемагничивание ферромагнетиков широко используется в различных отраслях науки и техники, в том числе в магнитных методах неразрушающего контроля. Эти процессы являются нелинейными и определяются тремя факторами: инверсией, вращением и парапроцессом [1]. Их строгое аналитическое описание представляет большие трудности. Поэтому технические расчеты магнитных цепей с ферромагнетиками проводятся с использованием большого количества математических моделей [2–23]. Однако выбор той или иной математической модели в каждом конкретном случае затруднен из-за отсутствия анализа границ применимости различных формул.

В данной работе проанализированы наиболее используемые аналитические выражения для описания основной кривой намагничивания и петель магнитного гистерезиса и подробно рассмотрена математическая модель с использованием арктангенсовых функций.

Основным требованием при построении модели является достаточная в каждом конкретном случае точность и простота описания основной кривой намагничивания и петель магнитного гистерезиса во всем диапазоне изменения перемагничивающего поля.

1. Моделирование кривой намагничивания

В области слабых магнитных полей ($H \ll H_{cs}$) основная кривая намагничивания хорошо описывается формулой Релея [1]

$$M = \chi_n H + b_R H^2, \quad (1)$$

где H напряженность намагничивающего поля, H_{cs} – коэрцитивная сила по предельному циклу, M – намагниченность ферромагнетика в магнитном поле напряженностью H , χ_n – начальная магнитная восприимчивость, b_R – коэффициент Релея.

В области подхода к насыщению используется формула Фрелиха [2]

$$M = \frac{M_s H}{a_s + H}, \quad (2)$$

где M_s – намагниченность насыщения, a_s – постоянная для описываемого материала.

Выражение (2) может быть представлено также в виде

$$\frac{H}{M} = \frac{a_s}{M_s} + \frac{H}{M_s}, \quad (3)$$

позволяющем весьма точно определить величину M_s в полях, при которых M еще значительно меньше M_s .

Для описания кривой намагничивания во всей области изменения магнитного поля используется большое количество различных функций.

В случае, если H и M (или магнитная индукция B) не меняют знака, то моделирующая функция может быть четной или нечетной. Если же H и B изменяют знак, то связывающая их функция может быть только нечетной. Коэффициенты в моделирующих функциях определяются по методу выбранных точек или по методу наименьших квадратов [3].

По методу выбранных точек результаты расчета привязываются к экспериментальным данным в заданных точках. Число этих точек на кривой намагничивания определяется количеством независимых коэффициентов, входящих в моделирующую функцию. Выбранные точки должны находиться на аппроксимируемом участке кривой намагничивания, и отражать его характерные особенности.

По методу наименьших квадратов коэффициенты моделирующей функции определяются из условия минимума среднеквадратичного откло-

нения ее значений от экспериментальных данных. Этот метод обеспечивает лучшее совпадение моделирующей функции с реальной кривой намагничивания, но является более громоздким по сравнению с методом выбранных точек.

В [3] выделено одиннадцать групп функций, используемых разными авторами для описания кривой намагничивания. Рассмотрим возможности наиболее перспективных функций из каждой группы.

1.1. Кусочно-линейная аппроксимация

Для расчета магнитопроводов с малой нелинейностью магнитных свойств материала, из которого они изготавливаются, применяют кусочно-линейную аппроксимацию, при которой аппроксимируемую кривую заменяют ломаной линией с одной или несколькими точками излома (рис. 1, а, б) [5, 6]. Количество аппроксимирующих участков зависит от требуемой точности расчета и диапазона изменения намагничивающего поля. Например, если материал находится вблизи области насыщения, то для аппроксимации кривой намагничивания используют обычно две прямые (рис. 1, а). В этом случае полагают, что в области от 0 до H_i

$$B = \mu_i H, \quad (4)$$

а в области $H > H_i$

$$B = B_i + \mu'_i (H - H_i), \quad (5)$$

где H_i и B_i – соответственно напряженность и индукция в точке излома, $\mu_i = B_i/H_i$, $\mu'_i = (B_i - B_0)/H_i$, а $B = B_0$ при $H = 0$ для второй кривой.

Если ферромагнетик намагничивается от размагниченного состояния до состояния магнитного насыщения, то для построения модели требуется не менее трех прямых, при этом тангенс угла наклона первой прямой устанавливается равным величине начальной магнитной проницаемости (рис. 1, б).

Достоинством кусочно-линейной аппроксимации является то, что при ее использовании нелинейную задачу можно свести к линейной, а ее главным недостатком – скачкообразное изменение производной при переходе от одного участка модели к другому, что при использовании численных методов расчета может привести к недопустимым погрешностям.

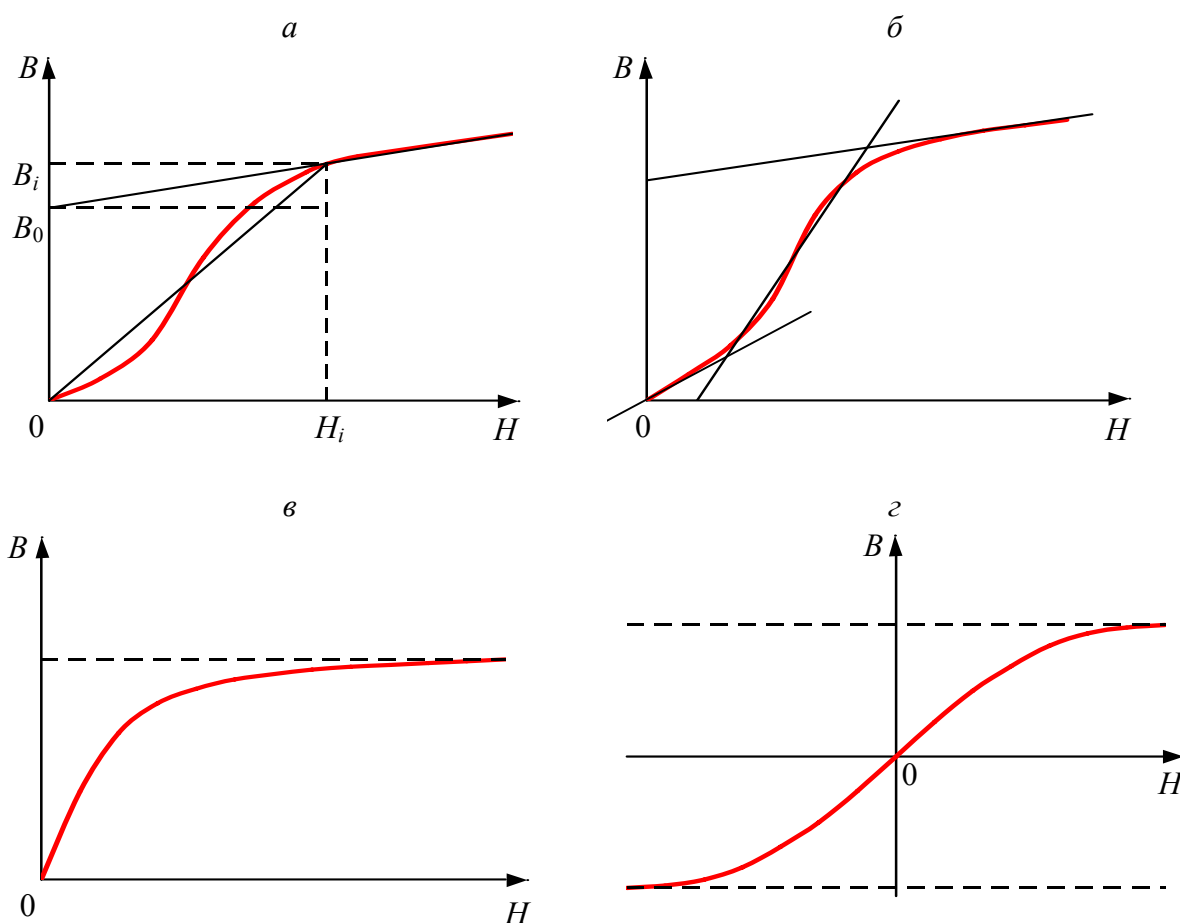


Рис. 1. Некоторые функции, используемые для аппроксимации кривой намагничивания

1.2. Гиперболическая аппроксимация

Для аппроксимации основной кривой намагничивания в области подхода к насыщению применяется формула Фрелиха в виде гиперболической функции (рис. 1, в)

$$B = \frac{H}{p_1 + p_2 H}, \tag{6}$$

где p_1 и p_2 – коэффициенты, определяемые методом выбранных точек.

Однако кривая намагничивания, определяемая этой функцией, не-симметрична относительно начала координат и может быть использована только в случае, если H и B не меняют знака и лишь в области сильных полей. Причем из нее вытекает, что магнитная проницаемость не имеет экстремума, а это не соответствует действительности.

1.3. Аппроксимация с использованием арктангенса

Математическая модель кривой намагничивания с использованием арктангенса имеет вид

$$B = p_1 \operatorname{arctg}(p_2 H) + p_3 H. \quad (7)$$

Так как первое слагаемое в выражении (7) с ростом H асимптотически приближается к прямым, параллельным оси абсцисс и расположенным от нее на расстоянии $\pm p_1$, то изменение магнитной индукции в этой области характеризует второе слагаемое.

Данная аппроксимация является нечетной и может быть использована для расчета магнитных цепей как с постоянным, так и с переменным полем. При малых значениях H расчетная кривая идет обычно несколько выше, а при больших немного ниже реальной кривой намагничивания.

Коэффициенты p_1 , p_2 и p_3 можно определить, выбрав три точки на кривой намагничивания. При этом для определения коэффициента p_2 следует решить уравнение

$$\frac{B_1 H_2 - B_2 H_1}{B_3 H_2 - B_2 H_3} = \frac{H_2 \operatorname{arctg}(p_2 H_1) - H_1 \operatorname{arctg}(p_2 H_2)}{H_2 \operatorname{arctg}(p_2 H_3) - H_3 \operatorname{arctg}(p_2 H_2)}, \quad (8)$$

а коэффициенты p_1 и p_3 можно определить по выражениям

$$p_1 = \frac{B_1 H_2 - B_2 H_1}{H_2 \operatorname{arctg}(p_2 H_1) - H_1 \operatorname{arctg}(p_2 H_2)}, \quad p_3 = \frac{B_1 - p_1 \operatorname{arctg}(p_2 H_1)}{H_1}. \quad (9)$$

1.4. Экспоненциальная аппроксимация

Среди аппроксимаций экспоненциальной группы формул наибольшее распространение получило выражение [4, 5]

$$B = e^{\frac{H}{p_1 + p_2 H}} - 1, \quad (10)$$

$$p_1 = \frac{H_1 H_2 \ln \frac{B_2 + 1}{B_1 + 1}}{(H_2 - H_1) \ln(B_1 + 1) \ln(B_2 + 1)}, \quad p_2 = \frac{H_2 \ln(B_1 + 1) - H_1 \ln(B_2 + 1)}{(H_2 - H_1) \ln(B_1 + 1) \ln(B_2 + 1)}, \quad (11)$$

где коэффициенты p_1 и p_2 определены по методу выбранных точек.

Для минимизации расхождений с экспериментальной кривой точки для привязки следует выбирать так, чтобы одна из них находилась в ненасыщенной области, а вторая после перегиба, но вблизи ее.

Данную аппроксимацию рекомендуется применять для расчета магнитных цепей с постоянным полем.

1.5. Логарифмическая аппроксимации

Аппроксимация основной кривой намагничивания с помощью логарифмической функции имеет вид [5]

$$B = p_1 \sqrt{\ln(p_2 H + 1)}. \quad (12)$$

В выражение (12) для того, чтобы при $H = 0$ $B = 0$, под знак логарифма введена 1. Однако это резко понижает точность описания кривой намагничивания в области слабых полей.

Коэффициенты p_1 и p_2 для выражения (12) определяются методом выбранных точек и имеют вид

$$p_1 = \frac{B_1}{\sqrt{\ln \frac{H_1 e^{(B_1^2 - B_2^2)}}{H_1 - H_2} + 1}}, \quad p_2 = \frac{e^{(B_1^2 - B_2^2)}}{H_1 - H_2}. \quad (13)$$

Логарифмическую аппроксимацию рекомендуется применять для расчета магнитных цепей с постоянным полем.

1.7. Аппроксимация степенным полиномом

Неплохие результаты получаются при аппроксимации основной кривой намагничивания нечетным степенным полиномом вида [5, 6]

$$H = p_1 B + p_2 B^3 + p_3 B^5 + \dots \quad (14)$$

или

$$B = q_1 H + q_2 H^3 + q_3 H^5 + \dots, \quad (15)$$

где $p_1, p_2, p_3 \dots, q_1, q_2, q_3 \dots$ – коэффициенты, определяемые обычно методом выбранных точек.

Чем больше членов в правой части выражения (14) или (15), тем лучше совпадают расчетная и реальная кривые намагничивания.

Во многих случаях ограничиваются только двумя членами полинома

$$H = p_1 B + p_2 B^3 \quad (16)$$

или

$$B = q_1 H + q_2 H^3. \quad (17)$$

В этом случае расчетная кривая до загиба обычно идет несколько ниже, а за загибом немного выше реальной кривой намагничивания. При использовании трех членов степенного полинома наблюдается обратная картина – до загиба расчетная кривая идет несколько выше, а за загибом немного ниже реальной кривой намагничивания. При этом допустимая точность приближения достигается лишь на ограниченных участках кривой намагничивания.

При использовании двух членов степенного полинома коэффициенты для выражения (17) имеют вид

$$q_1 = \frac{B_1 H_2^3 - B_2 H_1^3}{H_1 H_2^3 - H_1^3 H_2}, \quad q_2 = \frac{B_2 H_1 - B_1 H_2}{H_1 H_2^3 - H_1^3 H_2}. \quad (18)$$

Увеличение числа членов степенного полинома приводит к сложностям в определении коэффициентов аппроксимации.

Аппроксимация степенным полиномом является нечетной и может быть использована для расчета магнитных цепей как с постоянным, так и с переменным полем.

1.8. Аппроксимация гиперболическим синусом

Аппроксимации основной кривой намагничивания гиперболическим синусом [6]

$$H = p_1 \operatorname{sh}(p_2 B) \quad (19)$$

в принципе близка к аппроксимации полиномом по степеням B , так как разложив гиперболический синус в ряд, получаем полином по степеням B . Поэтому данная аппроксимация ведет себя подобно аппроксимации полиномом по степеням B .

Коэффициенты p_1 и p_2 для выражения (19), определенные методом выбранных точек, имеют вид

$$p_2 = \frac{\ln H_2/H_1}{B_2 - B_1}, \quad p_1 = \frac{H_2}{\operatorname{sh} p_2 B_2}. \quad (20)$$

Аппроксимация гиперболическим синусом является нечетной и может быть использована для расчета магнитных цепей как с постоянным, так и с переменным полем.

1.9. Аппроксимация гиперболическим тангенсом

Аппроксимация гиперболическим тангенсом может иметь вид [3, 6]

$$H = p_1 \operatorname{th}(p_2 B) \quad (21)$$

или

$$B = q_1 \operatorname{sh}(q_2 H). \quad (22)$$

Она близка к аппроксимации полиномом по степеням B (или H), так как разложив гиперболический тангенс в ряд, получаем полином по степеням B (или H). Поэтому данная аппроксимация ведет себя подобно аппроксимации полиномом по степеням B (или H). В [3] отмечается, что гиперболический тангенс хуже описывает кривую намагничивания, чем гиперболический синус. Так как выражения (21) и (22) являются нечетными функциями, то они могут быть использованы для расчета магнитных цепей как с постоянным, так и с переменным полем.

1.10. Аппроксимация методом сплайнов

При наличии значительного количества экспериментальных точек и высоких требованиях к точности аппроксимации довольно эффективным оказался метод сплайнов [7, 8], заключающийся в использовании на выбранных участках кривой намагничивания разных аппроксимаций. Метод сплайнов позволяет подобрать аппроксимирующие функции таким образом, что в точках стыковки непрерывна не только сама результирующая сплайн-функция, но и ее производные. Ограничением метода сплайнов является громоздкость расчета его коэффициентов.

1.11. Аппроксимация с помощью рациональных функций

Хорошую согласованность с экспериментом дает аппроксимация основной кривой намагничивания с помощью рациональных функций [9]

$$M = \frac{p_n H^n + p_{n-1} H^{n-1} + \dots + p_0}{q_n H^n + q_{n-1} H^{n-1} + \dots + q_0}, \quad (23)$$

где p_i и q_i – коэффициенты, $i = 0 \dots n$.

Старший коэффициент полинома в числителе дроби равен ординате экспериментальной точки на участке насыщения и определяет асимптотический характер поведения функции на этом участке. Младший коэффициент равен нулю в силу прохождения основной кривой намагничивания через начало координат. Остальные коэффициенты вычисляются по методу выбранных точек. Помимо необходимости большого числа $(2n + 1)$ экспериментальных точек авторы отмечают сильную зависимость коэффициентов дроби от изменения их числа или координат (кроме первого коэффициента в числителе).

2. Моделирование петель магнитного гистерезиса

В области слабых магнитных полей ($H \ll H_{cs}$) для описания петли магнитного гистерезиса часто используется формула, предложенная Релем [3]

$$M = (\chi_H + b_R H_m) H \pm \frac{b_R}{2} (H^2 - H_m^2), \quad (24)$$

где H_m – максимальное значение намагничивающего поля H , верхний знак относится к восходящей ветви петли, а нижний – к нисходящей.

Следует отметить, что расчет по (24) совпадает с реальной петлей магнитного гистерезиса лишь в крайних точках.

Верхнюю половину нисходящей ветви предельной петли ($H \geq -H_{cs}$) можно получить введением в (2) соответствующих постоянных [2]

$$M = \frac{M_r M_s (H + H_{cs})}{M_s H_{cs} + M_r H}, \quad (25)$$

где M_r – остаточная намагниченность.

Для описания верхней половины восходящей ветви предельной петли магнитного гистерезиса ($H \geq H_{cs}$) в выражении (25) следует перенести начало координат по оси абсцисс направо на отрезок $2H_{cs}$ [2]. Тогда

$$M = \frac{M_r M_s (H - H_{cs})}{H_{cs} (M_s - 2M_r) + M_r H}. \quad (26)$$

В [3] рассмотрен ряд выражений, описывающих петлю магнитного гистерезиса с помощью тригонометрических функций, гармонического ряда фигур Лиссажу, эллипса (метод Аркадьева), закона Гука, S-образной кривой (метод Акулова), при помощи рядов, с использованием полярных координат и др. Однако они не нашли широкого практического применения.

Интересен подход к построению модели гистерезисного цикла на основе обобщенных правил Маделунга [10, 11], который позволяет воссоздать кривые возврата. Его недостатком является необходимость использования определенных отрезков экспериментальных кривых намагничивания для построения замкнутых циклов и предсказания траектории перемагничивания.

В [12] показано, что для тонкой электротехнической стали после определения модифицированных коэффициентов преобразования Кондорского можно по только одной основной кривой намагничивания вычислить все основные гистерезисные характеристики материала.

2.1. Аппроксимации на основе арктангенсовых функций

Наибольшее распространение для описания петель магнитного гистерезиса получили аналитические выражения с использованием арктангенсовых функций [13–18].

Данный способ описания базируется на введении так называемого гистерезисного поля [3]. В наиболее обобщенной форме эта аппроксимация представлена в [16]

$$M(H) = p_1 \arctg \{ p_2 [H + H_r(M, H)] \} + M_k(M, H), \quad (27)$$

где $H_r(M, H)$ – гистерезисное поле, которое в общем случае может быть функцией мгновенных значений напряженности H магнитного поля или намагниченности M материала и направления их изменения; $M_k(M, H)$ – корректирующая функция поля или намагниченности, необходимая для компенсации физически неприемлемых особенностей намагниченности M как функции перемагничивающего поля H , обусловленных первым слагаемым в правой части выражения (27). Параметры аппроксимации определяют методом выбранных точек.

В зависимости от выбранных точек привязки к экспериментальным данным из (27) получаются все известные аппроксимации с использованием арктангенсовых функций для описания основной кривой намагничивания и петель магнитного гистерезиса [3, 15–21]. Области применения этих аппроксимаций и решаемые ими задачи различны из-за особенностей их построения. Рассмотрим возможности наиболее распространенных из них.

2.1.1. Аппроксимация Зацепина

Положив в (27) $M_k = 0$ и учтя, что при $H \rightarrow +\infty$ $M = M_s$, при $H = 0$ $M = \pm M_{rs}$, а при $H = -H_c$ для нисходящей и при $H = +H_c$ для восходящей ветвей петли магнитного гистерезиса $M = 0$, получаем следующую систему уравнений для определения p_1, p_2 и H_r

$$\left. \begin{aligned} M_s &= p_1 \frac{\pi}{2} \\ \pm M_{rs} &= p_1 \operatorname{arctg}(p_2 H_r) \\ 0 &= p_1 \operatorname{arctg}[p_2 (\mp H_{cs} + H_r)] \end{aligned} \right\}, \quad (28)$$

где знак « \leftarrow » относится к нисходящей, а знак « \rightarrow » – к восходящей ветвям петли магнитного гистерезиса.

Из (28) следует, что

$$p_1 = \frac{2}{\pi} M_s; \quad H_r = \pm H_{cs}; \quad p_2 = \frac{1}{H_{cs}} \operatorname{tg}\left(\frac{\pi M_{rs}}{2 M_s}\right), \quad (29)$$

где знак « \rightarrow », определяемый направлением перемагничивающего поля, относится к нисходящей, а « \leftarrow » – к восходящей ветвям петли магнитного гистерезиса.

С учетом (29) выражение (27) примет вид, предложенный в [15]

$$M = \frac{2}{\pi} M_s \operatorname{arctg}\left[\frac{H \pm H_{cs}}{H_{cs}} \operatorname{tg}\left(\frac{\pi M_{rs}}{2 M_s}\right)\right], \quad (30)$$

где знак « \rightarrow » соответствует нисходящей, а знак « \leftarrow » – восходящей ветвям предельной петли магнитного гистерезиса.

Формула (30) является одной из самых простых и компактных среди аппроксимаций с использованием арктангенсовых функций и нашла широкое применение в работах, развивающих метод высших гармоник [22].

Одним из недостатков аппроксимации (30) является то, что она применима только для описания предельной петли магнитного гистерезиса [16]. Чтобы использовать выражение (30) для описания частного гистерезисного цикла, необходимо заменить величины намагниченности насыще-

ния M_s , остаточной намагниченности M_{rs} и коэрцитивной силы H_{cs} по предельному циклу на соответствующие величины при амплитуде перемагничивающего поля H_m (M_m , M_r и H_c). Тогда

$$M = \frac{2}{\pi} M_m \operatorname{arctg} \left[\frac{H \pm H_c}{H_c} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} \frac{M_r}{M_m} \right) \right]. \quad (31)$$

Однако при описании частного гистерезисного цикла выражением (31) петля магнитного гистерезиса оказывается незамкнутой вследствие скачкообразного изменения гистерезисного поля H_r от $-H_c$ до $+H_c$ при переходе от восходящей ветви петли к нисходящей и от $+H_c$ до $-H_c$ при переходе от нисходящей ветви к восходящей.

Кроме того, намагниченность M по частной петле магнитного гистерезиса не может быть равна ее максимальному значению M_m при $H = H_m$ ввиду того, что арктангенсовая функция принимает значение $\pm \pi/2$ только при $H = \pm \infty$.

2.1.2. Аппроксимация Пономарева

Для устранения вышеотмеченных недостатков аппроксимации (30) Ю.Ф. Пономаревым было предложено [16] выбрать M_k равной

$$M_k = \mp \frac{p_1}{2} [\operatorname{arctg} p_2 (H_m + H_{cs}) - \operatorname{arctg} p_2 (H_m - H_{cs})], \quad (32)$$

а гистерезисное поле таким же, как и в предыдущей аппроксимации,

$$H_r = \pm H_{cs}, \quad (33)$$

где верхние знаки относятся к нисходящей, а нижние – к восходящей ветвям петли магнитного гистерезиса.

Выбор M_k в соответствии с (32) обеспечивает замыкание ветвей петли магнитного гистерезиса. Параметр p_1 определен из условия, чтобы намагниченность насыщения M_s по предельной петле магнитного гистерезиса совпала с ее действительным значением. Тогда из (27) с учетом того, что $M_k \rightarrow 0$ при $H_m \rightarrow +\infty$

$$p_1 = \frac{2}{\pi} M_s. \quad (34)$$

Параметр p_2 выбран из условия совпадения максимальной диффе-

ренциальной магнитной восприимчивости $\chi_{dm}^{пр}$ по предельной петле с ее действительным значением. Так как M_k не зависит от текущего значения H , то дифференциальная магнитная восприимчивость $\chi_d^{пр}$ имеет вид

$$\chi_d^{пр} = \frac{dM}{dH} = p_1 \frac{p_2}{1 + p_2^2 (H \pm H_{cs})^2}. \quad (35)$$

Условием максимума $\chi_d^{пр}$ является выражение

$$\frac{d^2 M}{dH^2} = \frac{-2p_1 p_2^3 (H \pm H_{cs})}{[1 + p_2^2 (H \pm H_{cs})^2]^2} = 0. \quad (36)$$

Из (36) получаем, что $\chi_d^{пр} = \chi_{dm}^{пр}$ при $H = H_{cs}$. Тогда

$$\chi_{dm}^{пр} = p_1 p_2. \quad (37)$$

Из (37) с учетом (34)

$$p_2 = \frac{\pi}{2} \frac{\chi_{dm}^{пр}}{M_s}. \quad (38)$$

Для удобства расчетов в [16] введена величина

$$H_s = \frac{M_s}{\chi_{dm}^{пр}}, \quad (39)$$

имеющая размерность напряженности магнитного поля.

В результате аппроксимация, предложенная Ю.Ф. Пономаревым, имеет вид

$$M = \frac{M_s}{\pi} \left\{ 2 \arctg \frac{\pi}{2} \left(\frac{H \pm H_{cs}}{H_s} \right) \mp \left[\arctg \frac{\pi}{2} \left(\frac{H_m + H_{cs}}{H_s} \right) - \arctg \frac{\pi}{2} \left(\frac{H_m - H_{cs}}{H_s} \right) \right] \right\}, \quad (40)$$

где верхние знаки относятся к нисходящей, а нижние – к восходящей ветвям петли магнитного гистерезиса.

Для иллюстрации физического смысла величины H_s автор ввел поня-

тие эквивалентной кусочно-линейной аппроксимации предельной петли магнитного гистерезиса, состоящей из четырех отрезков и имеющей те же значения $\chi_{dm}^{пр}$, H_{cs} и M_s , что и реальная петля предельного цикла. Тогда величина $2H_s$ определяет область магнитного поля, на протяжении которой по этой эквивалентной кусочно-линейной аппроксимации происходит изменение намагниченности от $-M_s$ до $+M_s$ и наоборот.

Из (40), положив $H_m \rightarrow +\infty$, получается выражение для предельной петли магнитного гистерезиса

$$M = \frac{2}{\pi} M_s \operatorname{arctg} \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{H \pm H_{cs}}{H_s} \right) \right], \quad (41)$$

а с учетом (39)

$$M = \frac{2}{\pi} M_s \operatorname{arctg} \left[\frac{\pi}{2} \chi_{dm}^{пр} \left(\frac{H \pm H_{cs}}{M_s} \right) \right]. \quad (42)$$

По форме выражение (41) совпадает с выражением (30), если в последней ввести обозначение

$$H'_s = \frac{\pi H_{cs}}{2 \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} \frac{M_{rs}}{M_s} \right)}, \quad (43)$$

имеющее, как и (39), размерность напряженности магнитного поля.

2.1.3. Формула Акулова–Лучевского

Н.С. Акулов и Б.А. Лучевский, применив при статистическом учете распределения коэрцитивных сил и внутренних магнитных полей различных кристаллитов или групп доменов функцию распределения типа Коши [13] (по аналогии с работой [14] для сегнетоэлектриков), получили следующее аналитическое выражение для петли магнитного гистерезиса

$$M = \chi_r H \pm \frac{M_{sm}(H_m)}{\pi} \left[2 \operatorname{arctg} \frac{H_{cs} \pm H}{q_0} - \left(\operatorname{arctg} \frac{H_{cs} + H_m}{q_0} + \operatorname{arctg} \frac{H_{cs} - H_m}{q_0} \right) \right], \quad (44)$$

где обратимая восприимчивость χ_r и величины M_{sm} и q_0 определяются экс-

периментально, верхние знаки относятся к нисходящей, а нижние – к восходящей ветвям петли.

При этом авторами [13] предлагается аппроксимировать χ_r следующим образом

$$\chi_r = \chi_n \text{ (для } H \leq H_{cs}) \text{ и } \chi_r = \chi_n e^{-\frac{H-H_{cs}}{H_{cs}}} \text{ (для } H > H_{cs}), \quad (45)$$

где χ_n – начальная восприимчивость, определяемая как тангенс угла наклона касательной к основной кривой намагничивания в точке $H = 0$.

Величина M_{sm} определяется по выражению

$$M_{sm}(H_m) = \frac{2M_s}{\pi} \arctg \frac{H_m}{p_0}, \quad (46)$$

где коэффициент p_0 определяется из (44) и (46) для петли гистерезиса любого частного цикла

$$p_0 = \frac{H_{me}}{\operatorname{tg} \left[\frac{\pi^2}{2} \frac{M_{re}}{M_s} \left(2 \arctg \frac{H_{cs}}{q_0} - \arctg \frac{H_{cs} + H_{me}}{q_0} - \arctg \frac{H_{cs} - H_{me}}{q_0} \right)^{-1} \right]}. \quad (47)$$

Величины H_{me} и M_{re} представляют собой соответственно предельное поле и остаточную намагниченность любого частного цикла.

$$p_0 = H_{cs} \sqrt{\frac{\chi_d^0 - \chi_{rm}}{\chi_d^m - \chi_d^0}}, \quad (48)$$

где χ_d^0 и χ_d^m – дифференциальная магнитная восприимчивость по петле гистерезиса при $H = 0$ и $H = -H_{cs}$ соответственно, χ_{rm} – обратимая магнитная восприимчивость по основной кривой намагничивания при $H = H_m$.

При $H_m \rightarrow +\infty$ $M_{sm} \rightarrow M_s$ и из (44) получается выражение для предельной петли магнитного гистерезиса

$$M = \frac{2}{\pi} M_s \arctg \frac{H_{cs} \pm H}{p_0}, \quad (49)$$

где верхние знаки относятся к нисходящей, а нижние – к восходящей вет-

вям петли.

Анализ выражения (44) показывает, что оно может быть получено из (27), если положить корректирующую функцию равной

$$M_k = \chi_r H \pm \frac{M_{sm}}{\pi} \left\{ 2 \left(1 - \frac{M_s}{M_{ms}} \right) \operatorname{arctg} \left(\frac{H_{cs} \pm H}{q_0} \right) - \left(\operatorname{arctg} \frac{H_{cs} + H_m}{q_0} + \operatorname{arctg} \frac{H_{cs} - H_m}{q_0} \right) \right\}. \quad (50)$$

Достоинством выражения (44) является то, что оно получено теоретически и в значительной мере отражает процессы перемагничивания ферромагнитных материалов. Основной его недостаток состоит в использовании нестандартных магнитных параметров, таких как остаточная намагниченность M_{re} по частному циклу при $H = H_{me}$, обратимая магнитная восприимчивость χ_{rm} и дифференциальные магнитные восприимчивости χ_d^0 и χ_d^m по основной кривой намагничивания. Поэтому выражение (44) не нашло широкого применения при решении практических задач.

2.1.4. Аппроксимация Мельгуя

В [17] М.А. Мельгуем, по аналогии с описанием гистерезисных процессов для сегнетоэлектриков, предложена аппроксимация, подобная (44). Основное отличие этой аппроксимации заключается в том, что корректирующая функция для нее имеет вид

$$M_k = \frac{\chi_H H_{cs}^2 H}{H^2 + H_{cs}^2} \pm \frac{M_s}{\pi} \frac{H_m^2}{H_m^2 + k_0 H_{cs}^2} \left\{ 2 \operatorname{arctg} \left[\frac{H_{cs} \pm H}{H_{cs}} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} \frac{M_{rs}}{M_s} \right) \right] \left[1 - \frac{H_m^2 + k_0 H_{cs}^2}{H_m^2} \right] - \right. \\ \left. - \operatorname{arctg} \left[\frac{H_{cs} + H_m}{H_{cs}} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} \frac{M_{rs}}{M_s} \right) \right] + \operatorname{arctg} \left[\frac{H_{cs} - H_m}{H_{cs}} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} \frac{M_{rs}}{M_s} \right) \right] \right\}, \quad (51)$$

где k_0 – коэффициент, определяемый из условия, что при $H = H_m = H_{cs}$ намагниченность по основной кривой намагничивания равна экспериментально измеренной величине M_c , верхние знаки относятся к нисходящей, а нижние – к восходящей ветвям петли.

Коэффициенты p_1 и p_2 и гистерезисное поле H_r в этой аппроксимации вводятся с учетом того, что при $H_m \rightarrow \infty$ $M_k = 0$.

Так при $H = \pm H_{cs}$ и $H_m \rightarrow 0$ $M_k = 0$ и $M = 0$. Тогда по аналогии с (29) $H_r = \pm H_{cs}$, где знак «+» – для нисходящей, а «-» – для восходящей ветвей петли.

При $H = H_m \rightarrow +\infty$ $M_k = 0$ и $M = M_s$. Тогда для p_1 имеем выражение, аналогичное (29). При $H = 0$ и $H_m = +\infty$ $M_k = 0$ и $M = M_{rs}$. Тогда

$$M_{rs} = \frac{2M_s}{\pi} \operatorname{arctg}(p_2 H_{cs}). \quad (52)$$

Откуда

$$p_2 = \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} \frac{M_{rs}}{M_s}\right)}{H_{cs}}. \quad (53)$$

Вместо (53) для удобства используется величина H_0 , имеющая размерность напряженности магнитного поля и подобная по форме выражению (43) для аппроксимации Ю.Ф. Пономарева.

$$H_0 = \frac{H_{cs}}{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} \frac{M_{rs}}{M_s}\right)}. \quad (54)$$

Примечание – Величины H_s , H'_s и H_0 имеют значения одного порядка с коэрцитивной силой предельной петли магнитного гистерезиса.

Таким образом, из (27) с учетом (51), (53) и (54) и знаков перемагничивающего поля вытекает аппроксимация М.А. Мельгуя

$$M = \chi_H \frac{H_{cs}^2 H}{H^2 + H_{cs}^2} \pm \frac{M_s}{\pi} \frac{H_m^2}{H_m^2 + k_0 H_{cs}^2} \times \left[2 \operatorname{arctg} \frac{H_{cs} \pm H}{H_0} - \left(\operatorname{arctg} \frac{H_{cs} + H_m}{H_0} + \operatorname{arctg} \frac{H_{cs} - H_m}{H_0} \right) \right], \quad (55)$$

где верхние знаки относятся к нисходящей, а нижние – к восходящей ветвям петли, а k_0 определяется из условия, что при $H = H_m = H_{cs}$ $M = M_c$

$$k_0 = \frac{M_s}{\pi} \frac{\operatorname{arctg}\left(2 \frac{H_{cs}}{H_0}\right)}{M_c - \chi_H \frac{H_{cs}}{2}} - 1. \quad (56)$$

Сравнение этой аппроксимации с экспериментальными данными, проведенное в [18], показало ее применимость для решения ряда задач неразрушающего контроля.

При $H_m \rightarrow \infty$

$$M = \frac{2}{\pi} M_s \operatorname{arctg} \frac{H_{cs} \pm H}{H_0} = \frac{2}{\pi} M_s \operatorname{arctg} \left[\frac{H_{cs} \pm H}{H_{cs}} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi M_{rs}}{2 M_s} \right) \right], \quad (57)$$

что с учетом принятых обозначений совпадает с (30), (41) и (49).

Большее число точек привязки с экспериментальными данными (четыре вместо трех) по сравнению с аппроксимацией Пономарева предполагает более точное описание гистерезисных явлений, а более простое определение входящих в выражение (55) параметров по сравнению с формулой Акулова–Лучевского делает аппроксимацию Мельгуя удобнее для практического использования.

3. Анализ математических моделей основной кривой намагничивания на основе арктангенсов

Одним из показателей работоспособности той или иной модели является возможность ее использования для описания основной кривой намагничивания и определяемой из нее магнитной восприимчивости, в том числе начальной и дифференциальной. Поскольку кривая намагничивания представляет собой совокупность вершин частных петель магнитного гистерезиса, то для ее получения в выражениях (30), (40), (44) и (55) следует положить максимальные значения намагничённости M_m и напряженности H_m намагничивающего поля равными текущим координатам M и H точек петли, то есть $H_m = H$ и $M_m = M$.

Для (30) указанного выше способа получения выражения для основной кривой намагничивания недостаточно, поскольку для того, чтобы основная кривая по этой модели проходила через ноль, необходимо из описывающей ее формулы убрать коэрцитивную силу, которая суммируется с соответствующим знаком с перемагничивающим полем. В результате получается выражение, описывающее безгистерезисную кривую намагничивания.

$$M = \frac{2}{\pi} M_s \operatorname{arctg} \left[\frac{H}{H_{cs}} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi M_{rs}}{2 M_s} \right) \right]. \quad (58)$$

Магнитная восприимчивость по (58) будет иметь вид

$$\chi^{\text{ок}} = \frac{M}{H} = \frac{2 M_s}{\pi H} \operatorname{arctg} \left[\frac{H}{H_{cs}} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi M_{rs}}{2 M_s} \right) \right], \quad (59)$$

дифференциальная магнитная восприимчивость

$$\chi_d^{\text{ок}} = \frac{2 M_s}{\pi H_{cs}} \frac{\operatorname{tg} \left(\frac{\pi M_{rs}}{2 M_s} \right)}{1 + \frac{H^2}{H_{cs}^2} \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi M_{rs}}{2 M_s} \right)}, \quad (60)$$

а максимум дифференциальной магнитной восприимчивости

$$\chi_{dm}^{\text{ок}} = \frac{2 M_s}{\pi H_{cs}} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi M_{rs}}{2 M_s} \right). \quad (61)$$

Анализ выражений (59–60) показал, что в области слабых намагничивающих полей H магнитная восприимчивость $\chi^{\text{ок}}$ и дифференциальная магнитная восприимчивость $\chi_d^{\text{ок}}$ на основной кривой намагничивания по аппроксимации (30) квадратично зависят от H , что не соответствует закону Релея. Из (59) и (60) следует, что при $H \rightarrow 0$ $\chi^{\text{ок}} = \chi_d^{\text{ок}} = \text{const}$, что удовлетворяет закону Релея. Однако максимум величин $\chi^{\text{ок}}$ и $\chi_d^{\text{ок}}$ наблюдается также при $H = 0$ (с ростом H эти величины только уменьшаются), что противоречит действительности. Тем не менее, следует отметить, что данная аппроксимация хорошо описывает изменение магнитной восприимчивости в области сильных магнитных полей, хотя для дифференциальной магнитной восприимчивости результаты расчета даже в этой области заметно отличаются от экспериментальных данных.

Из (40) при условии $H_m = H$ получается следующее выражение для описания основной кривой намагничивания по Пономареву

$$M = \frac{M_s}{\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{\pi}{2} \left(\frac{H + H_{cs}}{H_s} \right) + \operatorname{arctg} \left(\frac{H - H_{cs}}{H_s} \right) \right]; \quad (62)$$

$$\chi^{\text{ок}} = \frac{1}{\pi} \frac{M_s}{H} \left[\text{arctg} \frac{\pi}{2} \left(\frac{H + H_{cs}}{H_s} \right) + \text{arctg} \left(\frac{H - H_{cs}}{H_s} \right) \right]. \quad (63)$$

$$\chi_d^{\text{ок}} = \frac{M_s}{2H_s} \left[\frac{1}{1 + \frac{\pi^2}{4} \left(\frac{H + H_{cs}}{H_s} \right)^2} + \frac{1}{1 + \frac{\pi^2}{4} \left(\frac{H - H_{cs}}{H_s} \right)^2} \right]. \quad (64)$$

$$\chi_{dm}^{\text{ок}} = \frac{M_s}{2H_s} \left\{ \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 H_{cs}^2}{4H_s^2} \left[\sqrt{2 \sqrt{\frac{4H_s^2}{\pi^2 H_{cs}^2} + 1} - \left(\frac{4H_s^2}{\pi^2 H_{cs}^2} + 1 \right)} + 1 \right]^2} + \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 H_{cs}^2}{4H_s^2} \left[\sqrt{2 \sqrt{\frac{4H_s^2}{\pi^2 H_{cs}^2} + 1} - \left(\frac{4H_s^2}{\pi^2 H_{cs}^2} + 1 \right)} - 1 \right]^2} \right\}. \quad (65)$$

Зависимости $\chi^{\text{ок}}$ и $\chi_d^{\text{ок}}$ от H по (63–65) в области слабых полей хотя и являются квадратичными, но при $H \rightarrow 0$ их изменение согласуется с экспериментальными данными.

Основная кривая намагничивания и выражения для магнитных восприимчивостей по аппроксимации Акулова–Лучевского имеет вид

$$M = \chi_r H + \frac{M_{sm}(H)}{\pi} \left(\text{arctg} \frac{H_{cs} + H}{b_0} - \text{arctg} \frac{H_{cs} - H}{b_0} \right). \quad (66)$$

$$\chi^{\text{ок}} = \chi_r + \frac{M_{sm}(H)}{\pi H_m} \left(\text{arctg} \frac{H_{cs} + H}{b_0} - \text{arctg} \frac{H_{cs} - H}{b_0} \right). \quad (67)$$

$$\chi_d^{\text{ок}} = \chi_r + \frac{M_{sm}(H)}{\pi b_0} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{H_{cs} + H}{b_0} \right)^2} + \frac{1}{1 + \left(\frac{H_{cs} - H}{b_0} \right)^2} \right] + \frac{2M_s}{\pi^2 a_0} \frac{1}{1 + \frac{H^2}{a_0^2}} \left(\text{arctg} \frac{H_{cs} + H}{b_0} - \text{arctg} \frac{H_{cs} - H}{b_0} \right). \quad (68)$$

Следует отметить, что выражение (66) в области слабых полей согласуется с законом Релея гораздо лучше других моделей.

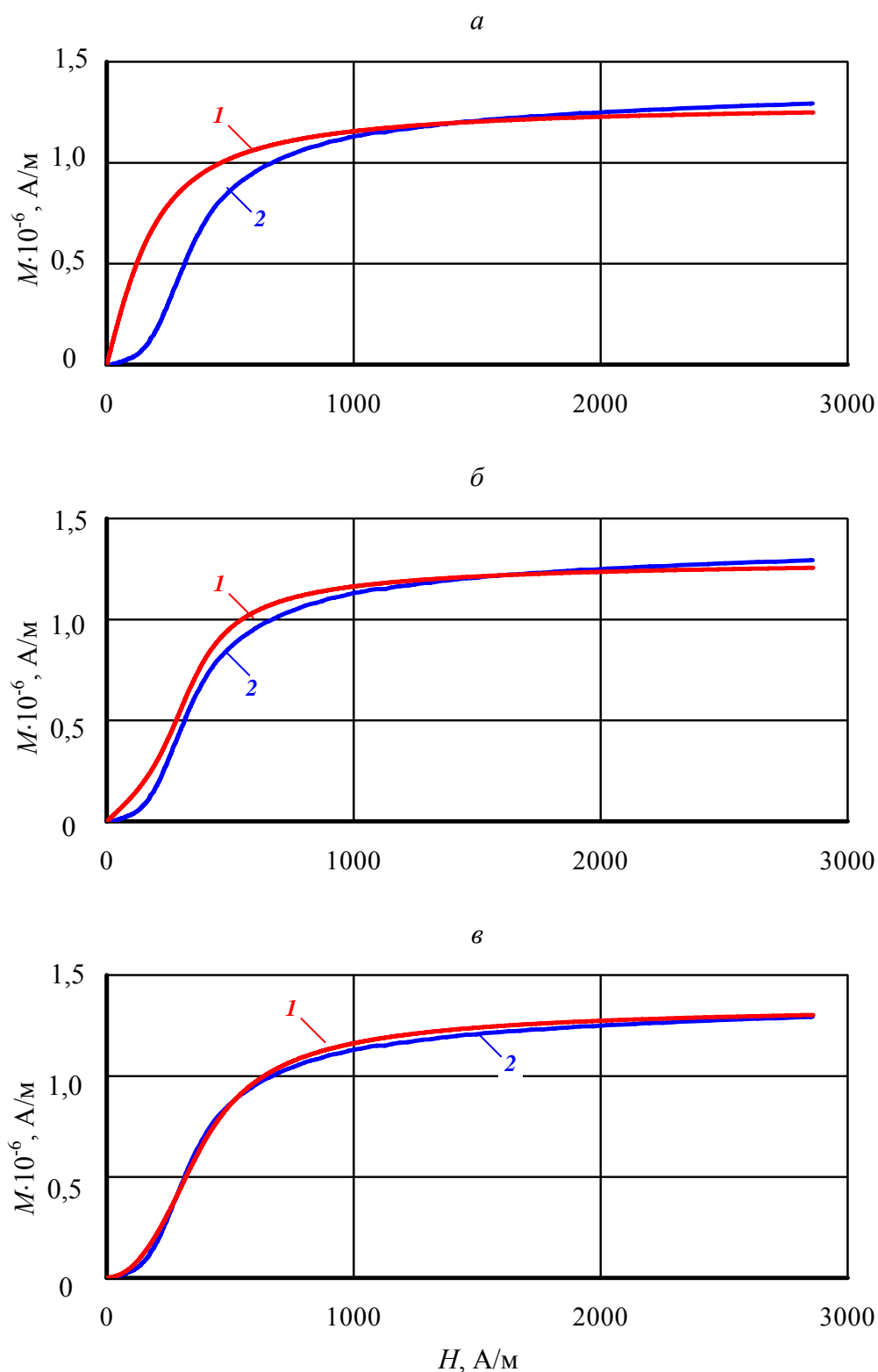
Из аппроксимации Мельгуя вытекают следующие выражения для основной кривой намагничивания и величин магнитных восприимчивостей

$$M = \chi_H \frac{H_{cs}^2 H}{H^2 + H_{cs}^2} + \frac{M_s}{\pi} \frac{H^2}{H^2 + k_0 H_{cs}^2} \left(\text{arctg} \frac{H_{cs} + H}{H_0} - \text{arctg} \frac{H_{cs} - H}{H_0} \right), \quad (69)$$

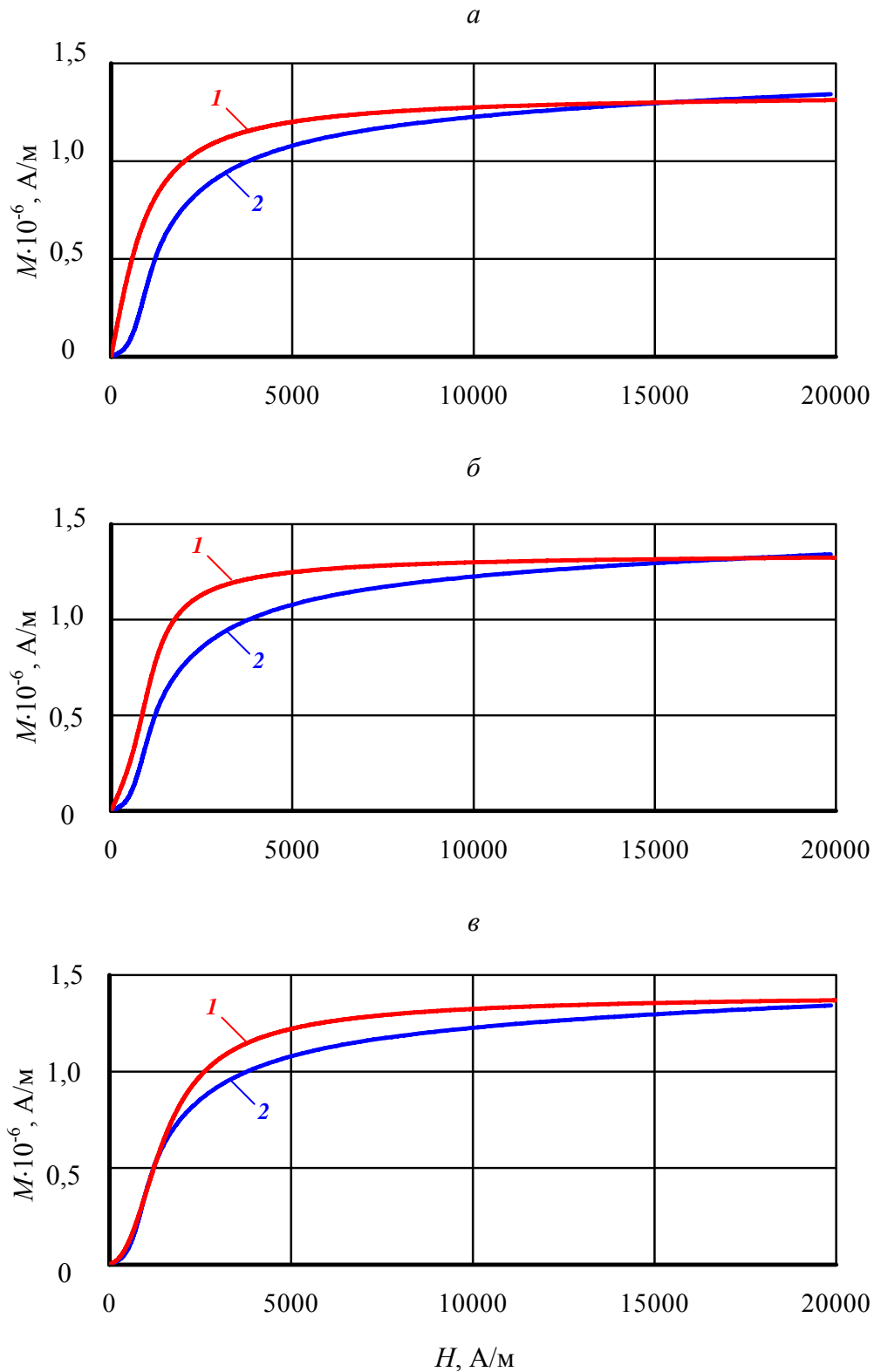
$$\chi^{\text{ок}} = \frac{M}{H} = \chi_H \frac{H_{cs}^2}{H^2 + H_{cs}^2} + \frac{M_s}{\pi} \frac{H}{H^2 + k_0 H_{cs}^2} \left(\text{arctg} \frac{H_{cs} + H}{H_0} - \text{arctg} \frac{H_{cs} - H}{H_0} \right), \quad (70)$$

$$\chi_d^{\text{ок}} = \chi_H \frac{H_{cs}^2 - H^2}{(H^2 + H_{cs}^2)^2} H_{cs}^2 + \frac{M_s}{\pi} \frac{H}{H^2 + k_0 H_{cs}^2} \left[\frac{H_0 H}{H_0^2 + (H_{cs} + H)^2} + \frac{H_0 H}{H_0^2 + (H_{cs} - H)^2} + \frac{2k_0 H_{cs}^2}{H^2 + k_0 H_{cs}^2} \left(\text{arctg} \frac{H_{cs} + H}{H_0} - \text{arctg} \frac{H_{cs} - H}{H_0} \right) \right]. \quad (71)$$

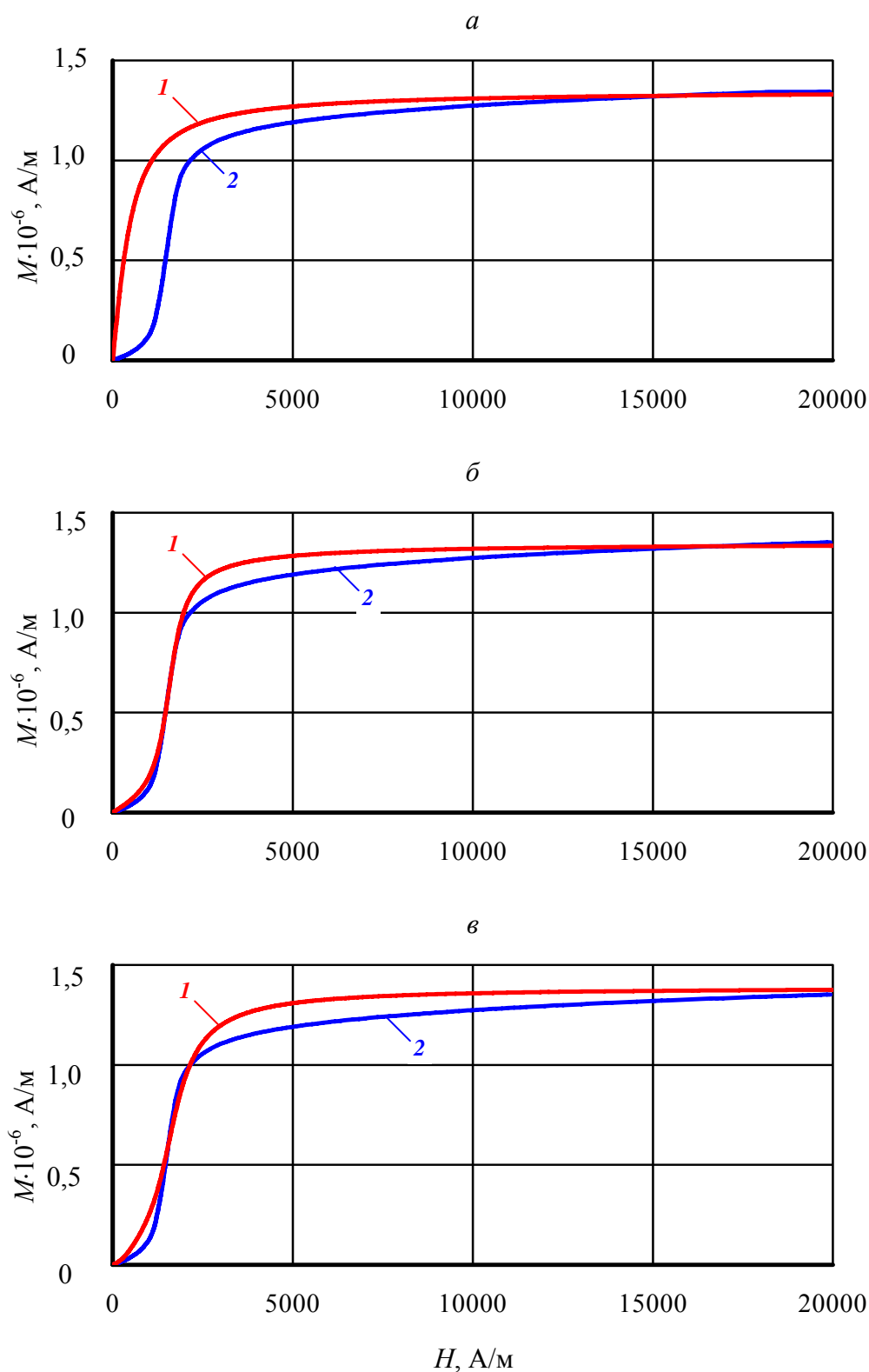
На рисунках 2–5 представлены основные кривые намагничивания для материалов с разными магнитными свойствами, рассчитанные по (58), (62) и (69) и построенные на основе экспериментальных данных, полученных с помощью установки УИМХ [24] на кольцевых образцах из сталей 08кп и 60С2. Для получения разных магнитных свойств образцы подвергались соответствующим режимам термообработки, что обеспечило изменение их коэрцитивной силы от 297 до 3120 А/м и соответствующего изменения других свойств. Этот диапазон изменения магнитных свойств образцов соответствует как магнитомягким, так и магнитотвердым материалам.



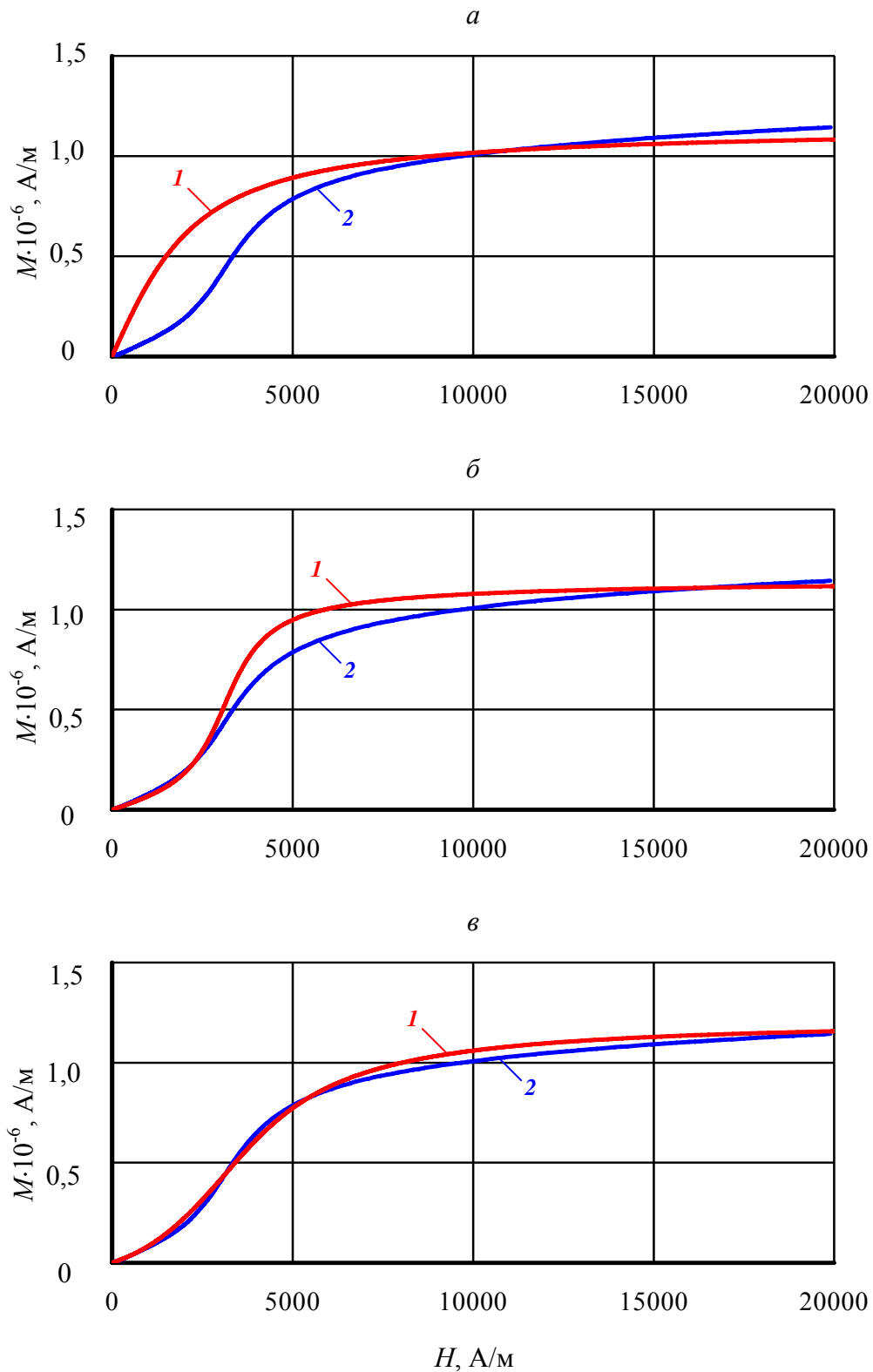
$H_{cs} = 297 \text{ A/m}; M_r = 0,86 \cdot 10^6 \text{ A/m}; M_s = 1,22 \cdot 10^6 \text{ A/m}; M_c = 0,44 \cdot 10^6 \text{ A/m}; \chi_H = 125$
 Рис. 2. Основная кривая намагничивания, рассчитанная (1) по (58) – *a*, по (62) – *б* и по (69) – *в*, в сравнении с экспериментальной кривой (2)



$H_{cs} = 907$ А/м; $M_r = 0,69 \cdot 10^6$ А/м; $M_s = 1,35 \cdot 10^6$ А/м; $M_c = 0,31 \cdot 10^6$ А/м; $\chi_H = 66$
 Рис. 3. Основная кривая намагничивания, рассчитанная (1) по (58) – а, по (62) – б и по (69) – в, в сравнении с экспериментальной кривой (2)



$H_{cs} = 1570$ А/м; $M_r = 1,1 \cdot 10^6$ А/м; $M_s = 1,35 \cdot 10^6$ А/м; $M_c = 0,62 \cdot 10^6$ А/м; $\chi_{нл} = 56$
 Рис. 4. Основная кривая намагничивания, рассчитанная (1) по (58) – а, по (62) – б и по (69) – в, в сравнении с экспериментальной кривой (2)



$H_{cs} = 3120$ A/м; $M_r = 0,76 \cdot 10^6$ A/м; $M_s = 1,15 \cdot 10^6$ A/м; $M_c = 0,44 \cdot 10^6$ A/м; $\chi_H = 49$
 Рис. 5. Основная кривая намагничивания, рассчитанная (1) по (58) – а, по (62) – б и по (69) – в, в сравнении с экспериментальной кривой (2)

Несмотря на то, что коэрцитивные силы материала исследуемых образцов значительно отличаются (крайние значения более чем на порядок), в ряде случаев (рисунки 2, *в* и 4, *в*) имеет место почти полное совпадение расчетных и экспериментальных кривых.

Из рисунков 2–5 видно, что большую согласованность с экспериментом имеют аппроксимации (62) и (69), причем для материала с $H_{cs} = 1570$ А/м формула (62) несколько лучше описывает основную кривую намагничивания, чем (69) (рисунок 4). В остальных случаях согласованность экспериментальных данных и расчетов по (69) существенно выше.

При относительно больших значениях коэрцитивной силы ($H_{cs} = 1570$ А/м и 3120 А/м) формула (62) дает хорошие результаты для основной кривой при намагничивающих полях меньше или порядка коэрцитивной силы (рисунки 4, *б* и 5, *б*). Однако для образцов с $H_{cs} = 297$ А/м и 907 А/м наблюдается существенное отличие аппроксимации по (62) от экспериментальных данных. В то же время в данном диапазоне полей формула (69) вполне удовлетворительно описывает основную кривую намагничивания во всех приведенных случаях (рисунки 2–5).

Заметно хуже рассматриваемые модели описывают основную кривую намагничивания при полях, больших коэрцитивной силы намагничиваемого материала (например, для $H_{cs} = 907$ А/м и 1570 А/м), причем отличие результатов расчета от экспериментальных данных имеет одинаковую для всех рассматриваемых моделей закономерность. Это показывает, что аппроксимации (58), (62) и (69) недостаточно точно описывают процесс приближения ферромагнетика к магнитному насыщению (рисунки 3 и 4).

Приведенное сравнение известных арктангенсовых аппроксимаций с экспериментальными данными показало, что формула (69) лучше других аппроксимаций описывает основную кривую намагничивания ферромагнитных материалов в широкой области изменения их магнитных свойств. К сожалению, в ряде случаев (рисунки 3, *в* и 4, *в*) результаты расчета по формуле (69) нельзя признать приемлемыми во всем диапазоне изменения намагничивающего поля (от 0 до H_m). Поэтому объективно назрела потребность в дальнейшем развитии этой аппроксимации.

4. Анализ математических моделей петель магнитного гистерезиса на основе арктангенсов

Выражения (30), (40), (44) и (55) используют разные параметры для описания петель магнитного гистерезиса, чем существенно и отличаются между собой.

При $H_m \rightarrow \infty$ петля магнитного гистерезиса является предельной. По-

скольку в (30) величина H_m не входит, то ее вид при $H_m \rightarrow \infty$ не изменяется. При переходе к предельной петле этот же вид принимают и другие аппроксимации (41), (49) и (57), хотя они и отличаются используемыми параметрами. Ввиду того, что в (30) и в (57) входят одни и те же параметры, эти аппроксимации для предельной петли гистерезиса тождественно равны.

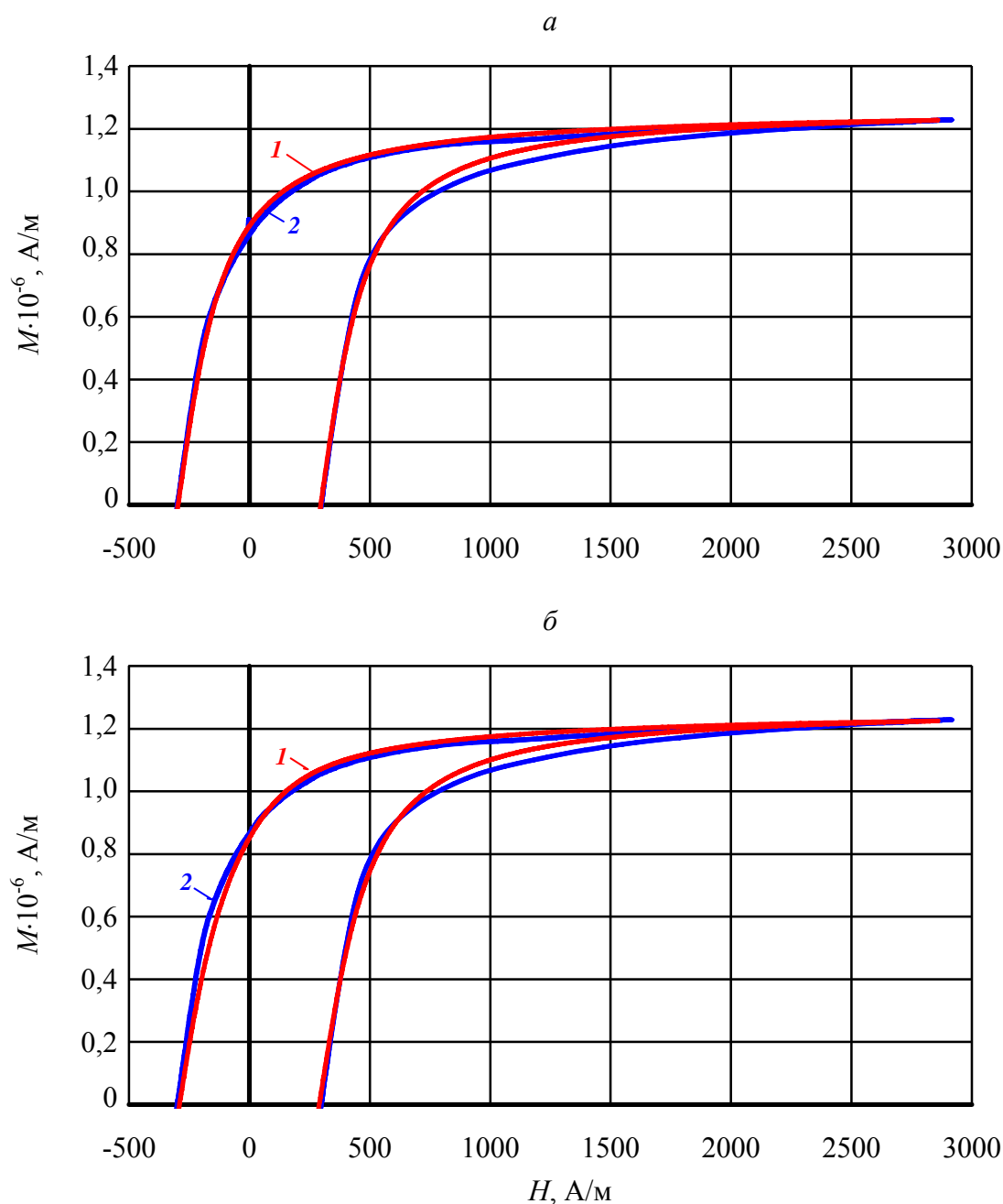
Поскольку выражения (30) и (57) для предельной петли магнитного гистерезиса совпадают, то сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными проведем только для моделей (41) и (57). Это сравнение (рисунки 6–9) показывает, что в ряде случаев расчет предельной петли магнитного гистерезиса по (41) подтверждается с точностью в несколько процентов. Однако в других случаях погрешность расчета превышает 20%. Отметим также, что расчет предельной петли гистерезиса по (41) всегда приводит к завышенным значениям остаточной намагниченности M_{rs} . Данное обстоятельство следует учитывать при практическом применении выражения (41).

В задачах, где определяющим параметром является дифференциальная магнитная проницаемость, использование выражений (41) и (57) необходимо дополнительно обосновать. В неразрушающем контроле такие задачи возникают при анализе высших гармонических составляющих сигнала. Для них можно рекомендовать выражение (41), так как оно изначально разрабатывалось для решения подобных задач.

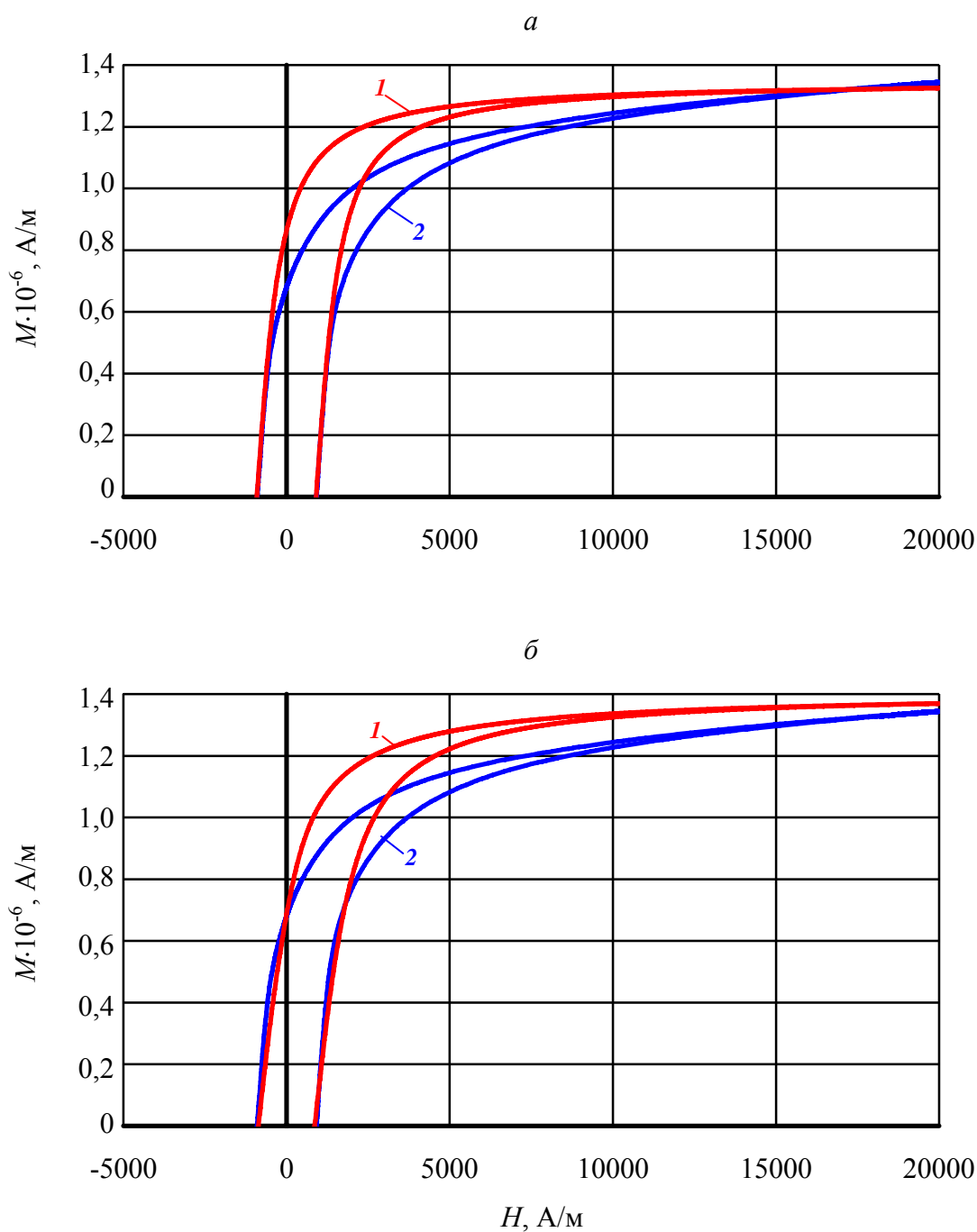
В то же время во всем интервале изменения намагниченности по предельной петле магнитного гистерезиса для ее описания лучше подходят выражения (30) и (57), которые используют основные магнитные параметры предельной петли и поэтому по величине намагниченности лучше согласованы с экспериментом. Необходимо также отметить, что для всех четырех моделей максимум дифференциальной восприимчивости по предельной петле гистерезиса находится при поле, равном коэрцитивной силе.

Для полей в области коэрцитивной силы материала наиболее точно петля магнитного гистерезиса описывается выражением (41), поскольку именно в данной области находятся два параметра, которые используются этой моделью. За пределами этой области полей расчет по (41) может приводить как к завышенным, так и к заниженным результатам.

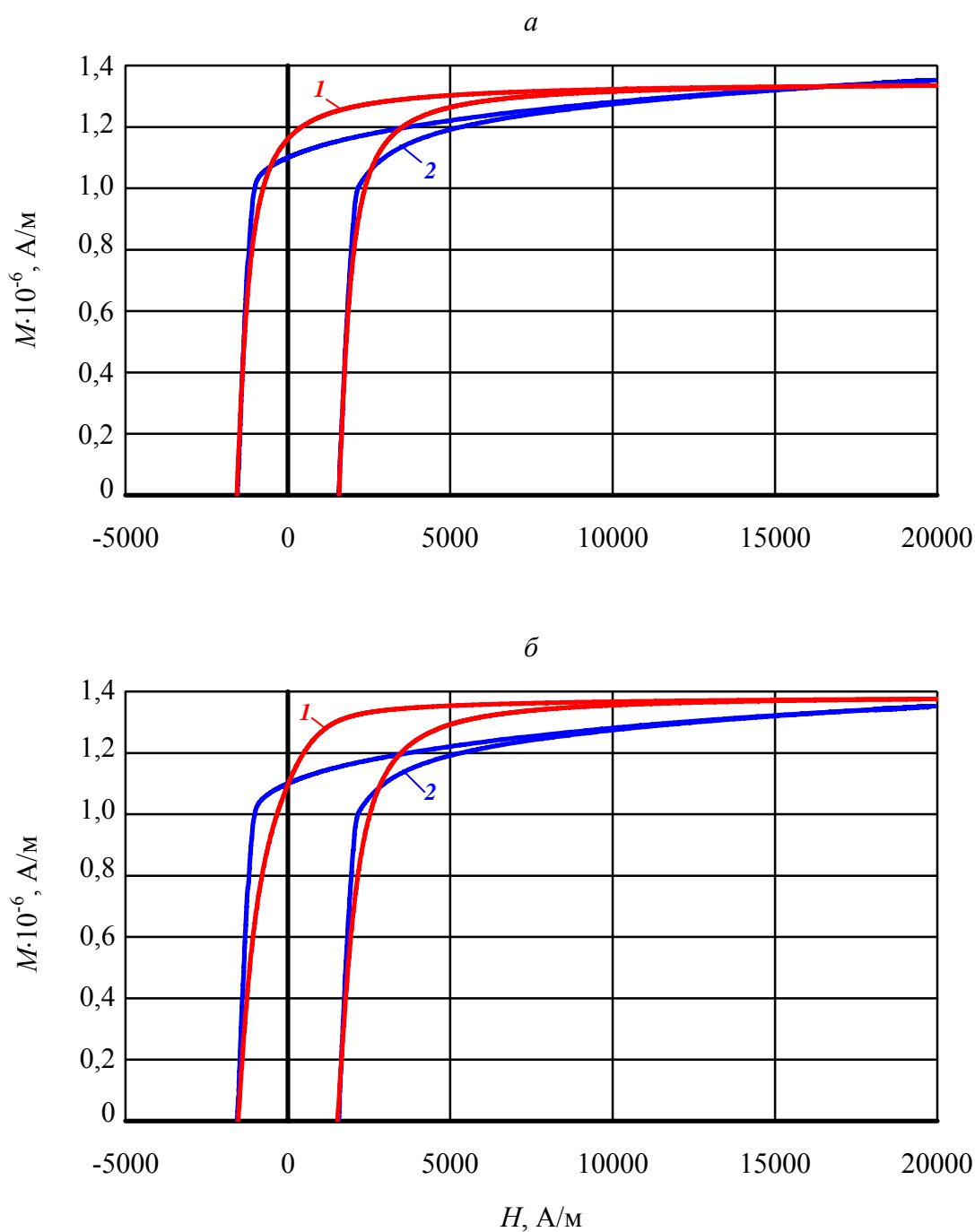
Общим ограничением для выражений (30), (41) и (57) является недостаточно точное описание ветвей петли магнитного гистерезиса при подходе к насыщению. Уже при полях порядка нескольких коэрцитивных сил эти модели дают существенно отличающиеся от экспериментальных результаты независимо от магнитных характеристик материала. Максимум погрешности приходится обычно на интервал полей, меньших коэрцитивной силы и больших трех коэрцитивных сил.



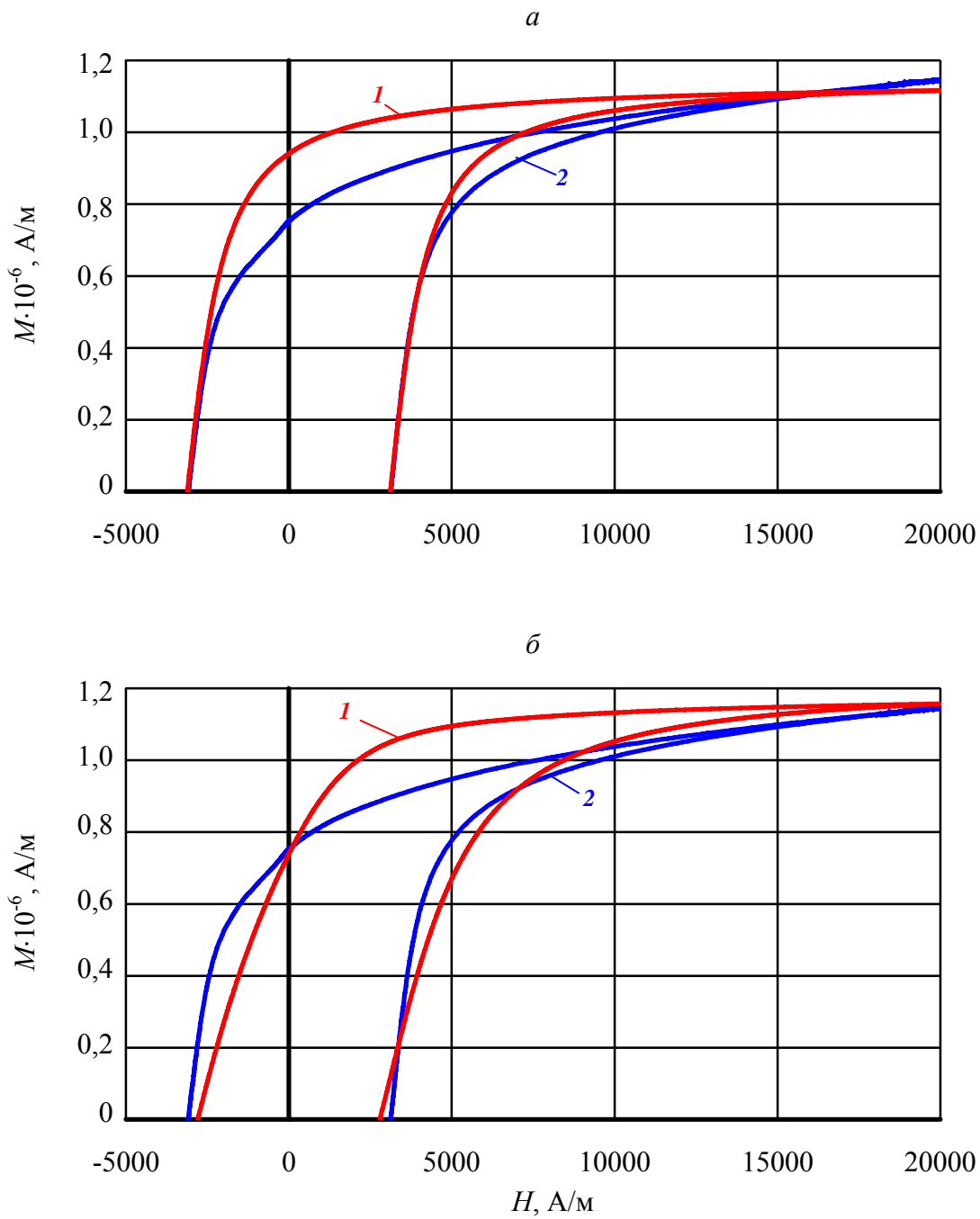
$H_{cs} = 297 \text{ A/m}; M_r = 0,86 \cdot 10^6 \text{ A/m}; M_s = 1,22 \cdot 10^6 \text{ A/m}; M_c = 0,44 \cdot 10^6 \text{ A/m}; \chi_n = 125$
 Рис. 6. Предельная петля магнитного гистерезиса, рассчитанная (1) по (41) – а, и по (57) – б, в сравнении с экспериментальной кривой (2)



$H_{cs} = 907 \text{ A/m}; M_r = 0,69 \cdot 10^6 \text{ A/m}; M_s = 1,35 \cdot 10^6 \text{ A/m}; M_c = 0,31 \cdot 10^6 \text{ A/m}; \chi_n = 66$
 Рис. 7. Предельная петля магнитного гистерезиса, рассчитанная (1) по (41) – а, и по (57) – б, в сравнении с экспериментальной кривой (2)



$H_{cs} = 1570 \text{ A/m}; M_r = 1,1 \cdot 10^6 \text{ A/m}; M_s = 1,35 \cdot 10^6 \text{ A/m}; M_c = 0,62 \cdot 10^6 \text{ A/m}; \chi_n = 56$
 Рис. 8. Предельная петля магнитного гистерезиса, рассчитанная (1) по (41) – а, и по (57) – б, в сравнении с экспериментальной кривой (2)



$H_{cs} = 3120 \text{ A/m}; M_r = 0,76 \cdot 10^6 \text{ A/m}; M_s = 1,15 \cdot 10^6 \text{ A/m}; M_c = 0,44 \cdot 10^6 \text{ A/m}; \chi_H = 49$
 Рис. 9. Предельная петля магнитного гистерезиса, рассчитанная (1) по (41) – а,
 и по (57) – б, в сравнении с экспериментальной кривой (2)

Известные в настоящее время аппроксимации петли магнитного гистерезиса на основе арктангенсов можно условно разделить на те, которые требуют экспериментально снятых значений магнитных параметров для каждой частной петли гистерезиса, и те, которые обеспечивают аппроксимацию каждой частной петли по результатам измерения магнитных параметров ферромагнетика на предельной петле гистерезиса. Из рассмотренных нами моделей на основе арктангенса к первому варианту формул для описания частных петель магнитного гистерезиса относится выражение (30), а ко второму – выражения (40), (44) и (55).

Заключение

1. Проведенный анализ показал, что в что большинство известных математических моделей основной кривой намагничивания, предельной и частных петель магнитного гистерезиса адекватно описывают процессы намагничивания и перемагничивания ферромагнитного материала только в узком диапазоне изменения намагничивающего поля.

2. Математические модели на основе арктангенсов в целом удовлетворительно описывают процесс намагничивания и перемагничивания ферромагнетика. Однако при решении конкретных задач для материалов с различными магнитными свойствами выбор той или иной модели существенно неоднозначен. В первую очередь эти модели не соответствуют закону Релея. Значительные отклонения от экспериментальных данных наблюдаются также при полях от одной до нескольких коэрцитивных сил и при приближении ферромагнетика к магнитному насыщению. Поэтому весьма актуальной остается задача по совершенствованию математических моделей на основе арктангенсовых функций, чтобы их можно было применять для более широкого класса задач и материалов во всем диапазоне возможных изменений величин намагничивающего поля..

Литература

1. Вонсовский С.В., Шур Я.С. Ферромагнетизм. – М.-Л.: Гостехиздат, 1948. – 816 с.
2. Янус Р.И. Магнитная дефектоскопия. – М.-Л.: Гостехиздат, 1946. – 171с.
3. Бессонов Л.А. Электрические цепи со сталью. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1948. – 344 с.
4. Городецкий П.Г. Обзор аналитических выражений кривых намагничивания и гистерезисных петель. – Киев: Воениздат, 1956. – 59 с.
5. Зарипов М.Ф., Фикс-Марголига И.Г., Вахитова Х.З. Анализ различных методов аппроксимации кривой намагничивания. – ДАН УЗ СССР, 1974, № 3, с. 8–10.
6. Филиппов Е. Нелинейная электротехника. – М.: Энергия, 1976. – 496 с.
7. Кадочников А.И., Хан Е.Б. Аппроксимация основной кривой намагничивания па-

- раболической сплайн-функцией. – Изв. вузов, Электромеханика, 1991, № 7, с. 11–15.
8. Кадочников А.И., Хан Е.Б., Лобанова Н.Б. Нестандартный сплайн для аппроксимации кривых намагничивания и перемагничивания. – Дефектоскопия, 1992, № 11, с. 75–81.
 9. Михайлов С.П., Литвинцев А.А. Аппроксимация экспериментальных кривых намагничивания с помощью рациональных функций. – Дефектоскопия, 1995, № 6, с. 52–55.
 10. Зирка С.Е., Мороз Ю.И. Моделирование магнитного гистерезиса на основе обобщенных правил Маделунга. Часть 2. Описание алгоритмов. – Технічна електродинаміка, 1999, № 2, с. 7–13.
 11. Зирка С.Е., Мороз Ю.И. Алгоритмы моделирования гистерезиса в задачах магнетодинамики. – Технічна електродинаміка, 2002, № 5, с. 7–13.
 12. Кадочников А.И., Федорищева Э.Э., Чернова Г.С. Исследование связи между основной кривой намагничивания и семейством статических петель гистерезиса для тонкой электротехнической стали. – Дефектоскопия, 1991, № 9, с. 27–32.
 13. Акулов Н.С., Лучевский Б.А. К теории кривых намагничивания ферромагнетиков в области инверсии. – ДАН БССР, 1971, т. XV, № 6, с. 484-487.
 14. Мельгуй М.А. К теории гистерезисных явлений в сегнетоэлектриках. – ДАН БССР, 1965, т. IX, № 9, с. 581-584.
 15. Зацепин Н.Н. Аналитическая функция, описывающая ход симметричной петли магнитного гистерезиса. – Весці АН БССР, сер. фіз.-тэхн. навук, 1973, № 4, с. 29–31.
 16. Пономарев Ю.Ф. Гармонический анализ намагниченности ферромагнетиков, перемагничиваемых переменным полем, с учетом магнитного гистерезиса. I. Способ описания петель магнитного гистерезиса. – Дефектоскопия, 1985, № 6, с. 61–67.
 17. Мельгуй М.А. Формулы для описания нелинейных и гистерезисных свойств ферромагнетиков. – Дефектоскопия, 1987, № 11, с. 3–10.
 18. Мельгуй М.А., Шидловская Э.А. Экспериментальная проверка аналитических выражений для нелинейных свойств ферромагнитных материалов. – Дефектоскопия, 1987, № 11, с. 10–18.
 19. Векслер А.З., Семенко Н.Г. Исследование двухтактного измерительного ферротранзисторного преобразователя напряжения. – Автоматика и телемеханика, 1965, № 9, с. 1599–1605.
 20. Пономарев Ю.Ф. Феррозонды с продольным возбуждением в малых переменных полях. – Геофизическое приборостроение. – Л.: Гостехиздат, 1961, вып. 10, с. 54–68.
 21. Розенблат М.А. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. – М.: Наука, 1966. – 720 с.
 22. Зацепин Н.Н. Метод высших гармоник в неразрушающем контроле. – Минск: Наука и техника, 1980. – 167 с.
 23. Акулов Н.С., Лучевский Б.А. К статистической теории гистерезисных явлений. – ДАН БССР, 1970, т. XIV, № 6, с. 499–502.
 24. Мельгуй М.А. К теории гистерезисных явлений в сегнетоэлектриках. – Доклады АН БССР, 1965. – т. IX, № 3, с. 156–159.

Статья поступила в редакцию 18.05.11

**ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНДИКАТОРОВ СТРУКТУРЫ
ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА ТИПА ИЧ В УСЛОВИЯХ
ПРОИЗВОДСТВА**
**EXPERIENCE OF USE OF INDICATORS OF HIGH-STRENGTH CAST IRON
STRUCTURE OF ИЧ-TYPE IN REQUIREMENTS OF MANUFACTURE**

*Баев А.Р., Коновалов Г.Е., Майоров А.Л., Парадинец В.В.
Baev A.R., Konovalov G.E., Mayorov A.L., Paradinets V.V.*

Рассмотрена практическая реализация ультразвукового метода контроля структуры отливок из высокопрочного чугуна специальным прибором "Индикатор высокопрочного чугуна ИЧ-21". Рассмотрены базовые принципы лежащие в основе работы индикатора. Обобщен опыт использования индикатора ИЧ-21 в условиях литейного производства. Показано, что индикатор может быть использован для 100% контроля изделий в состоянии отливки без привлечения высококвалифицированного персонала. Индикатор ИЧ 21 может быть использован как при производстве чугуна, так и при входном контроле ответственных деталей. Кроме того, индикатор может быть использован при автоматизированном контроле.

Practical realization of a method of an ultrasonic quality testing of high-strength iron casting structure by using the special device "The Indicator of high-strength cast iron ИЧ-21" is considered. Base principles underlying in operations of the indicator are analyzed. Experience of use of indicator ИЧ-21 in requirements of foundry manufacture is generalized. It is shown, that the indicator can be used for 100 % testing of products in a state of casting without attraction of the highly skilled personnel. Indicator ИЧ-21 can be used both by manufacture of cast iron, and at the input test of critical parts. Besides, the indicator can be used at the automated testing.

Сегодня невозможно представить машиностроительное производство без использования чугуна. Применение чугунов позволяет в значительной степени сократить затраты связанные с производством изделий сложной конфигурации. Чугун является одним из основных конструкционных материалов, используемых как литейный сплав. Легирование чугунов позволило получить чугун с шаровидным графитом, что в значительной степени повысило его прочность. Благодаря хорошим механическим свойствам из высокопрочного чугуна изготавливают ответственные детали, например, коленчатые валы,

зубчатые колеса, корпуса автомобильных моторов, крупные прокатные валки, корпуса паровых турбин и др.

Однако до настоящего времени проблема формообразования графита не решена в такой степени, чтобы можно было предсказывать с полной уверенностью структуру чугуна в результате плавки и термической обработки [1, 2, 3]. Это вызывает необходимость проведения исследований структуры полученного чугуна после каждой плавки. В подавляющем большинстве случаев на предприятиях контроль структуры чугуна осуществляется, преимущественно, разрушающими методами, включая металлографию, испытания на разрыв, твердость, и другие. При высокой информативности эти методы трудоемки и длительны. Кроме того, следует учитывать, что поскольку взятие пробы производится локально из определенной части отливки (например, из литника), далеко не всегда по результатам исследований представляется возможным судить о структуре и физико-механических свойствах отливок во всем объеме. В особенности это касается заготовок, имеющих сложную форму и большую разницу в толщинах в разных частях отливки.

Известно немало попыток применения неразрушающих методов к контролю структуры отливок чугуна. Наибольшую известность получили акусто-реверберационные методы, которые построены на анализе амплитуды и спектра свободных колебаний в изделии. Эти методы являются интегральными и успешно работают только на отливках простой формы. В этом случае, в качестве выходных параметров используется декремент затухания Δ , обусловленный поглощением и рассеянием упругих волн на микро-неоднородностях металла (графитовых включениях) и упругие константы материала, зависящие от основы и формы графитовых включений. Магнитные методы, основанные на анализе петли гистерезиса кривой намагничивания существенно зависят от формы изделия и свойств основы. Однозначного ответа о структуре графита они не дают, в особенности в изделиях сложной формы. Локальные магнитные методы не позволяют проанализировать структуру на большую глубину. Наличие на поверхности отливки отбела может стать фатальным для таких измерений.

Наиболее перспективным, на наш взгляд, является использование ультразвуковых методов. Это связано с тем, что параметры распространения упругих волн (скорость, коэффициент затухания) связаны со структурой и механическими характеристиками чугуна. Ранее разными авторами были проведены исследования зависимости пара-

метров распространения упругих волн от структуры чугуна (формы графитовых включений и материала основы) [4, 5, 6]. Было установлено, что модуль Юнга у чугунов с шаровидным графитом более чем в 2 раза превышает модуль Юнга у серых чугунов с хлопьевидным графитом. Скорость упругих продольных волн является величиной напрямую зависящей от модуля Юнга. На рис. 1 приведены зависимости скорости продольных волн от процентного содержания шаровидного графита в чугуне. Данные зависимости имеют одинаковую характерную форму для различных по размеру графитовых включений. Поэтому являются хорошей основой для применения скорости распространения ультразвука в качестве основного информационного параметра. Затухание ультразвука также зависит от содержания шаровидного графита. Чем шаровидного графита больше, тем меньше

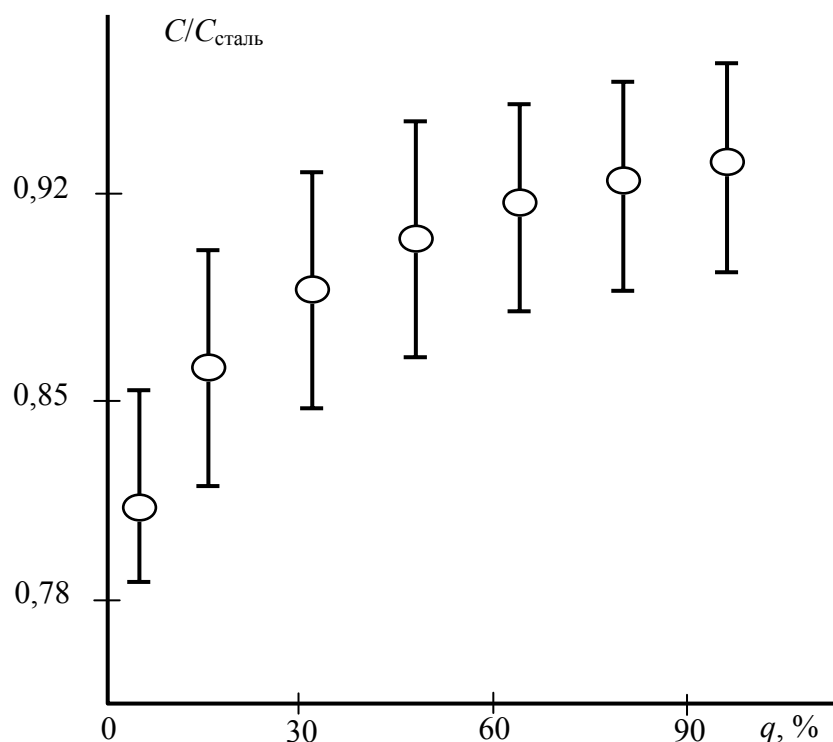


Рис. 1. Влияние содержания шаровидного графита на скорость продольной упругой волны в чугуне: верхняя граница соответствует мелким по размеру графитовым включениям, нижняя - крупным.

затухание. Однако, измерение затухания более сложная процедура, чем измерение скорости и, соответственно, результаты таких измере-

ний имеют значительно меньшую точность. Следует учитывать, что скорость звука, в свою очередь зависит не только от формы графита, но и от его концентрации и размера. Но при этом зависимость от формы графитовых включений наибольшая.

Известно, что структура и свойства чугуна меняются от производства к производству. Металлической основой высокопрочного чугуна может быть: феррит, феррит с перлитом и перлит. По нашим измерениям, чугуны с перлитной основой имеют скорость продольной упругой волны на $\sim (5-7)\%$ больше чем в чугунах с ферритной основой. Это связано с тем, что в перлитном чугуне 0,8% углерода находится в связанном состоянии и не участвует в формировании упругих свойств. С увеличением доли феррита появляется больше свободного графита, который и оказывает влияние на скорость распространения. Эти изменения могут быть учтены при определении формы графита по скорости звука.

Мешающим фактором, который в значительной степени может сказаться на результатах измерений является наличие цементита. Скорость распространения упругих волн в цементите соответствует стали. Поэтому, в зависимости от процентного содержания цементита ошибка измерений может быть фатальной и привести к недобраковке при фактическом наличии серого чугуна. В то же время, если при производстве предпринимаются необходимые меры для получения чугуна с шаровидным графитом, получение белого чугуна с большим содержанием цементита является маловероятным. Отбел может возникнуть на поверхности, и в этом случае он легко определяем (можно измерить скорость поверхностной волны или просто попробовать обработать поверхность напильником). В данной ситуации при измерении скорости следует учитывать толщину слоя отбела.

Важной характеристикой высокопрочного чугуна является временное сопротивление при растяжении. Считается, что эта величина прямо пропорциональна твердости чугуна и модулю Юнга. Причем для разных чугунов данная зависимость определяется технологией получения чугуна и его основой. Как уже указывалось выше, модуль Юнга может быть измерен достаточно точно по скорости распространения продольных упругих волн. Но твердость не может быть измерена с достаточной точностью акустическими методами. Она определяется в основном структурой металлической основы и в меньшей степени, параметрами графитовых включений. Для определения временного сопротивления при растяжении требуется построение корреляционных зависимостей для конкретного вида чугуна. Опыт по-

строения таких зависимостей показывает, что данный параметр может определяться неразрушающими методами с точностью не менее (7-10)%.

Анализ факторов действующих на производстве и оказывающих влияние на качество конечного продукта показывает, что в принципе, основные параметры, характеризующие чугун, могут быть получены в условиях лабораторных исследований путем прямых измерений на соответствующем оборудовании. Однако такие измерения могут быть проведены только на единичных изделиях и образцах свидетелях. К сожалению, результаты, полученные при таких измерениях, далеко не всегда соответствуют настоящему состоянию чугуна во всей партии изделий или, даже, в различных частях отливки. Насущным является наличие инструмента, который позволил бы проверять все детали. Анализ показывает, что важнейшей характеристикой высокопрочного чугуна при прочих равных условиях является степень сфероидизации



Рис. 2. Индикатор высокопрочного чугуна ИЧ-21

графита. То есть, если лабораторными испытаниями на образцах свидетелях установлено, что чугун соответствует предъявляемым ему требованиям, то в дальнейшем необходимо проверить сфероидизацию графита на всех ответственных отливках в ответственных сечениях. Исходя из этого, можно сформулировать основные требования к оборудованию для оперативной проверки чугуна: возможность проведения измерений непосредственно в условиях литейного производ-

ства; прибор должен быть переносным, так, чтобы его можно было носить от отливки к отливке, а не отливку к нему; автономное питание; простота измерений, отсутствие специальных требований к квалификации персонала; возможность измерения непосредственно на отливке без подготовки поверхности. Такой прибор был разработан и получил название индикатор высокопрочного чугуна ИЧ. В настоящее время выпускается версия ИЧ-21 (рис. 2).

В качестве основной схемы измерений был принят теневой метод, то есть когда анализируемая область размещается между преобразователями (рис. 3). Общая методология измерений построена на сравнении истинного размера отливки (измеренного, например, штангенциркулем (рис. 4) между приложенными датчиками) с граничными размерами, полученными с помощью индикатора. При проведении обследования индикатор измеряет временной промежуток, необходимый акустическому сигналу для преодоления расстояния между преобразователями. На основании полученных данных о скорости звука для серого и высокопрочного чугуна, время распространения пересчитывается в линейный размер для этих чугунов. Промежуточные значения говорят о частичной сфероидизации графита или наличии вермикулярного графита. Такая схема была выбрана исходя из того, что измерения расстояния являются самыми простыми и общедоступными. Для их проведения нет необходимости тратить время и средства на обучение персонала.

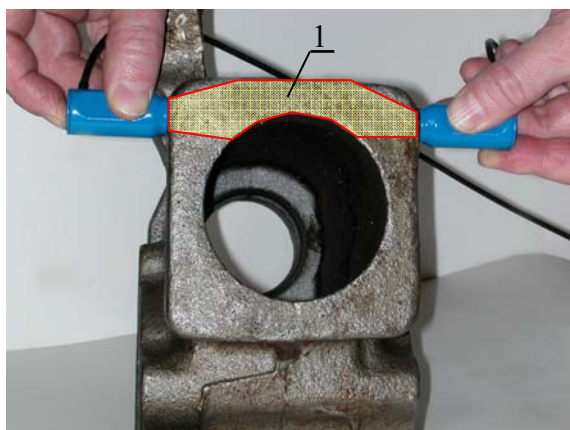


Рис. 3. Теневая схема контроля:
1- контролируемая область



Рис. 4. Измерение размера

Для определения граничных зависимостей скоростей звука для серого и высокопрочного чугуна были выполнены предварительные исследования на образцах серого и высокопрочного чугунов произведенных на разных заводах. В результате установлены существенные

зависимости между скоростью ультразвука и маркой серого чугуна. В частности, установлено, что при изменении марки чугуна с СЧ10 до СЧ20 скорость продольной волны C изменяется от 3300 до 4200 м/с. При этом верхний предел скорости C^{\max} для серого чугуна составляет ~ 4900 м/с. Такая зависимость, по-видимому, обусловлена вариацией размеров вкраплений пластинчатого графита, что сопровождается изменением упругих констант и, соответственно, прочности чугуна. Обобщение данных по скорости звука для высокопрочного чугуна с шаровидной формой графитовых включений дает значение минимальной скорости $C_{\min} \sim 5550$ м/с.

Для того чтобы обеспечить необходимую точность измерения временного интервала необходимо получить акустический импульс с крутовозрастающей амплитудой. Для этого необходимо добиться широкой частотной полосы пропускания преобразователей. С этой целью были разработаны специальные электроакустические преобразователи с высоким демпфированием и акустически жестким протектором из керамики. Следует отметить, что обычно не принято использовать для шероховатых поверхностей с классом обработки хуже, чем $R_z 40$ преобразователи с акустически жестким протектором. Это объясняется рассеянием в промежуточном контактном слое. Но так как мы используем теневую схему контроля, то процессы, происходящие в этой зоне, могут быть учтены с помощью постоянной поправки. Преимуществом является постоянство зазора по сравнению с акустически мягким протектором, что позволяет обеспечить необходимую точность измерений.

В индикаторе предусмотрено программное обеспечение управления амплитудой генератора. Это позволяет регулировать амплитуду сигнала, для того, чтобы она находилась примерно на одинаковом уровне при разной базе измерений (расстоянию между преобразователями).

Индикация результатов обследования отливок представляется на жидкокристаллическом дисплее в виде двух граничных значений расстояний. На рис. 5 представлен пример полученной информации. Если истинное значение больше (равно) значения указанного в правой части индикатора (на рис. 5, в качестве примера, это значение равно 23,2 мм), то чугун в отливке соответствует высокопрочному чугуну. Если истинное значение меньше (равно) значения указанного в левой части индикатора (на рис. 3, в качестве примера, это значение равно 20,3 мм), то данная отливка выполнена из серого чугуна. Истинное расстояние между поверхностями, измеренное штангенцир-

кулем, может оказаться в интервале между значениями указанными на индикаторе (например, 21,5 мм). Такая область обозначена на индикаторе как <<?>> (см. рис. 5). Это значит, что в отливке произошла только частичная сфероидизация графита. То есть, в обследуемой части отливки присутствует как сферический, так и хлопьевидный графит.

Предусмотрено два режима работы индикатора: при первом режиме оператор сравнивает расстояние между поверхностями отливки, на которые устанавливаются датчики во время обследования (измеренное штангенциркулем), с размерами отливки, выведенными на дисплей индикатора; во втором режиме реальное расстояние между этими поверхностями вводят в память индикатора заранее. Тогда, в результате контроля отливки, индикатор не только выводит на дисплей измеренные расстояния, но и включает один из светодиодов. Красный - если отливка из серого чугуна или зеленый - если отливка из высокопрочного чугуна.

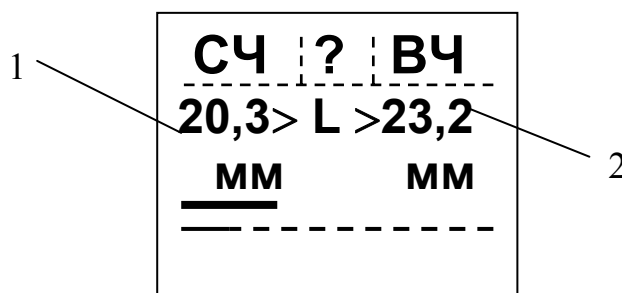


Рис. 5. Внешний вид результата контроля:
1 - максимальное граничное значение для серого чугуна; 2 - максимальное граничное значение для высокопрочного чугуна

Варианты представления информации при использовании второго режима контроля представлены на рис. 6.

В данном примере все отливки имеют реальное расстояние между поверхностями, на которых устанавливались датчики $L = 24,9$ мм (позиция отображается в верхней части ЖКИ). На рис. 6а представлен результат контроля отливки, в которой не по всему объему сформировалась структура ВЧШГ и имеются области СЧ. Об этом информирует вопросительный знак на ЖКИ и включающийся в результате контроля красный светодиод.

На рис. 6б представлены результаты контроля отливки того же размера, но из серого чугуна. В этом случае измеренное индикатором значение в левой части ЖКИ (29,7 мм) больше чем реальный размер

отливки (24,9 мм). При этом на ЖКИ выводятся буквы СЧ и включается красный светодиод.

На рис. 6в представлены результаты контроля отливки того же размера, но из ВЧШГ. В этом случае измеренное индикатором значение в правой части ЖКИ (24,2 мм) меньше, чем реальный размер отливки (24,9 мм). При этом на ЖКИ выводятся буквы ВЧ и включается зеленый светодиод.

Первый режим целесообразно использовать, когда расстояние между поверхностями, к которым прижимают датчики во время контроля, изменяется от детали к детали. Например, это могут быть разные места отливок.

Второй режим более производительный, но может использоваться только для таких отливок, линейные размеры которых мало изменяются от детали к детали.

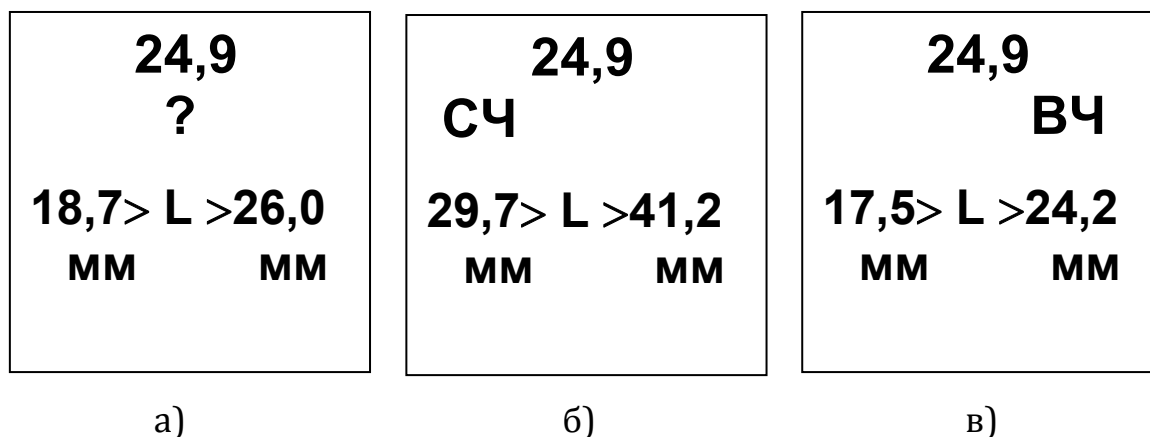


Рис. 6

К настоящему времени предложенные способ и оборудование используются на целом ряде предприятий. Индикатор позволяет проводить измерения непосредственно в отливках. Подготовка отливки к контролю требует только дробеструйной очистки от окалины. Можно обследовать отливки и после нанесения грунтовки, даже если она еще не высохла. Все это позволяет оперативно проверять сто процентов продукции, так как контроль занимает всего несколько секунд на измерение. Часто возникает необходимость контроля тонкостенных изделий. К настоящему времени аппаратно уже решены вопросы контроля отливок с толщиной стенки до ~5мм.

Для ряда изделий интерес представляет контроль при одностороннем доступе. Обычно это связано с ограниченным доступом к одной из поверхностей. Известны попытки использования для этих це-

лей магнитных методов. Их общим недостатком является локальность - недостаточное проникновение магнитного поля вглубь материала. Так как известно, что поверхность чугуновой отливки, особенно больших размеров и со значительными перепадами толщин может иметь вблизи поверхности структуру отличную от внутренней. В этом случае магнитные методы не могут дать истинной информации о степени сфероидизации графита. Кроме того, в ряде случаев, требуется обработка поверхности, для того чтобы провести достоверные измерения.

Нами были проведены исследования направленные на разработку средств контроля при одностороннем доступе. Для конкретной конфигурации отливки вопрос решается достаточно просто. Необходимо разработать конкретный датчик для данной отливки и поменять служебные настройки прибора (программное обеспечение). Сложнее обстоят дела при создании универсального измерительного средства. Это связано с условиями формирования соответствующей диаграммы направленности преобразователей и фазовыми изменениями сигнала на границах отражения.

К настоящему времени разработана конструкция специализированного датчика и соответствующее программное обеспечение для контроля при одностороннем доступе. При этом, максимальная толщина изделия в направлении прозвучивания для используемого датчика не должна превышать ~70мм для серого чугуна. Высокопрочные чугуны прозвучиваются лучше, так как затухание в них значительно меньше. Этот факт тоже может служить признаком высокопрочного чугуна. То есть, если на больших толщинах сигнал отсутствует, то это либо серый чугун, либо в отливке присутствуют значительные дефекты, приводящие к рассеянию. Кроме того, необходимо обеспечить точное измерение толщины стенки и следить за качеством отражающей поверхности. Чем меньше измеряемое расстояние, тем выше вероятность ошибки, вызванной фазовыми искажениями сигнала на поверхности отражения. Но, как показывает опыт, всегда можно найти необходимые корреляционные коэффициенты, которые позволяют с уверенностью производить разделение чугуновых отливок по степени сфероидизации графита.

В качестве развития задачи контроля при одностороннем доступе было разработано оборудование для контроля цилиндрических

изделий с наружной стороны без необходимости измерения толщины стенки. Данная задача была решена специально для изделий с ограниченным доступом к внутренней поверхности. В этом случае отсутствуют специальные требования к качеству внутренней поверхности. Базовой величиной, по которой ведется отбраковка, является внешний диаметр отливки.

Опыт применения индикаторов в промышленности показывает:

1. Предложенный метод и оборудование (индикатор высокопрочного чугуна серии ИЧ) позволяют проводить сто процентный контроль продукции в условиях литейного производства.

2. Индикатор не требует привлечения специально обученного персонала к процессу измерений.

3. Использование индикатора позволяет отказаться как от интегральной оценки структуры чугуна в отливке (акустический метод и некоторые магнитные методы), так и от контроля по отдельным локальным точкам (микромагнитные методы и т.д.), а проверять ответственные сечения.

4. Индикатор может использоваться как при производстве высокопрочного чугуна, так и при входном контроле, причем не выборочном, а всего объема изделия.

5. Полученные зависимости скорости звука от марки чугунов (особенно серых) позволяют проводить работы по разработке методики разбраковки чугунов по маркам на базе разработанного способа и оборудования.

В заключение следует отметить, перед разработанным индикатором не ставилась задача замены всего комплекса испытательного оборудования для проверки механических свойств чугуна. Но лабораторные исследования позволяют испытывать только единичные экземпляры продукции или образцы свидетели. Использование индикатора типа ИЧ позволяет проводить контроль всей продукции. Набранная статистика показывает соответствие результатов, полученных с помощью индикатора с результатами традиционных методов исследования.

Литература

1. Гуляев А.П. Металловедение. Учебник для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1986. 544 с.
2. Неижко И.Г. О теориях образования шаровидного графита в чугунах. Сб. Кристаллизация, структурообразование и свойства модифицированного чугуна. Киев, ИПЛ АН УССР, 1981. С. 11-27
3. Неижко И.Г. Графитизация и свойства чугуна. Киев, Наукова думка, 1989.-202 с., с илл.
4. Воронкова Л.В. Ультразвуковой контроль чугунных отливок.- М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998, 40с.
5. Иванушкин Е.С. Оценка механических свойств высокопрочного чугуна в отливках ультразвуковым методом / Е.С. Иванушкин // Литейное производство. 1988 - №8. - С. 11-12.
6. Попов М.А. Ультразвуковой контроль механических свойств высокопрочного и серого чугунов / М.А. Попов, О.В. Чигогидзе // Литейное производство. 1977. - №2. - С. 30-31

Статья поступила в редакцию 26.04.11

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ. МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ

Nondestructive Testing in Industry. Magnetic Testing

Горбаш В.Г., Делендик М.Н., Павленко П.Н.

Gorbash V.G., Delendick M.N., Pavlenko P.N.

В статье приводится информация об использовании магнитного метода контроля для решения различных задач в области неразрушающего контроля.

The article provides information on the application of magnetic testing method for solving various problems in the field of nondestructive testing.

Магнитный вид контроля относится к одному из первых видов неразрушающего контроля, который стал использоваться для диагностики продукции и промышленных объектов. Его используют для дефектоскопии (с помощью магнитных методов могут быть выявлены закалочные, шлифовочные трещины, закаты, усталостные трещины и другие поверхностные дефекты с раскрытием несколько микрометров), определения твердости, структуроскопии, определения марок сталей, измерения физических параметров материалов (например, магнитной проницаемости, магнитной восприимчивости), для измерения толщины покрытий, механических напряжений и даже химического анализа.

Существует несколько десятков методов, позволяющих реализовать данный вид контроля. Наиболее часто в настоящее время используются магнитопорошковый, индукционный, феррозондовый, магниторезистивный, магнитополупроводниковый, магнитографический, пондеромоторный метод, метод контроля с помощью датчиков Холла и др. [1]. Все они основаны на зависимости физических параметров ферромагнетиков от напряженности магнитного поля (принципе вихревых токов, изменении магнитного потока, изменения силы притяжения магнита и т.п.). Если ранее магнитные методы применяли, в основном, для неразрушающего контроля изделий из ферромагнитных материалов, находящихся в намагниченном состоянии, то теперь научно технический прогресс расширил границы применимости этих методов и на немагнитные материалы. Для этого стали

использовать новые возможности, например, применение магнитных пленок, нанесенных на немагнитный материал, позволяет определять механические характеристики изделий из немагнитных материалов и даже бетонных конструкций. Стандартные магнитные методы являются недорогими и не требуют значительного времени для измерений. К магнитным методам испытаний металлов относятся: магнитная дефектоскопия; магнитный анализ; магнитные измерения; испытания готовых магнитов.

1. В основу магнитных методов дефектоскопии положено изменение параметров магнитных полей и магнитных характеристик ферромагнитных материалов, способных существенно изменять их под действием внешнего (намагничивающего) магнитного поля [2]. При этом измерения могут проводиться как в приложенных, так и остаточных полях. В зависимости от объектов контроля применяют различные способы намагничивания контролируемых объектов [3,4]. Намагничивают детали постоянным, импульсным, переменным или комбинированным магнитным полем в продольном, поперечном или циркулярном направлении [5]. Выбор направления магнитного поля и способа намагничивания зависит от ориентации дефектов. Магнитное поле должно быть перпендикулярно направлению дефекта. После контроля детали размагничивают нагревом выше точки Кюри или переменным магнитным полем с амплитудой, равномерно уменьшающейся от некоторой максимальной величины (равной или несколько большей амплитуды намагничивающего поля) до нуля.

При магнитопорошковом методе на поверхность намагниченной детали наносят ферромагнитный порошок. Под действием магнитных полей частицы порошка скапливаются над дефектами. Возможно выявление тонких и мелких трещин с раскрытием больше 0,0025 мм и глубиной не менее 0,025 мм. В стыковых сварных соединениях с усилением, выполненных автоматической сваркой, выявляются трещины с раскрытием не менее 0,01 мм и глубиной не менее 0,1 мм, в соединениях, выполненных ручной сваркой, - соответственно 0,025 мм и 0,25 мм. Используются порошки разного цвета. Для деталей с блестящей светлой поверхностью применяют черный порошок магнетита Fe_3O_4 . При контроле деталей с темной поверхностью используют цветные, окрашенные или отожженные, кирпично-красные, серебристые или темно-коричневые порошки либо люминисцентные порошки, светящиеся при ультрафиолетовом облучении. Часто для удобства нанесения используют магнитные, в том числе магнитолюминисцентные, суспензии на масляно-керосиновой или водной основе. Если применя-

ется сухой метод контроля или используется водная суспензия, то контролируемые поверхности следует очистить от смазки и масла. Иногда перед выполнением контрольных операций контролируемые поверхности покрывают тонким просвечивающимся слоем белой краски или белого нитролака, чтобы черный порошок был лучше виден. Преимущества магнитопорошкового метода: высокая чувствительность к тонким и мелким трещинам, простота, оперативность и наглядность, возможность применения для деталей практически любых форм и размеров [6-9].

При магнитографическом методе магнитные поля рассеяния записывают на магнитную ленту, наложенную на участок контроля [10]. Магнитные ленты состоят из основы толщиной 100 мкм, сделанной из триацетата или лавсана, и магнитного слоя толщиной 10...20 мкм, состоящего из окиси железа, взвешенной в лаке. Они могут использоваться многократно. Записи на ленте преобразуются в электрические сигналы и наблюдаются на экране дефектоскопа. В автоматических устройствах применяется непрерывная запись и воспроизведение с бесконечной магнитной ленты в виде петли. Преимущества магнитографического метода контроля: высокая разрешающая способность (возможность выявления мелких дефектов), позволяющая регистрировать неоднородные магнитные поля, соизмеримые с размером частиц магнитного слоя ленты (порядка 1 мкм), возможность регистрации дефектов на сложных поверхностях и в узких зазорах [11]. Недостатки: необходимость вторичного преобразования информации, регистрируются только составляющие магнитных полей вдоль поверхности ленты, сложность размагничивания и хранения ленты - необходимо предотвращать воздействие внешних магнитных полей.

При магнитоферрозондовом методе используются датчики - феррозонды [12]. Они имеют катушки, генерирующие магнитное поле, взаимодействующее с остаточным или наведенным полем контролируемой детали. При попадании дефекта в зону взаимодействия этих полей в катушках датчика возникнет электрический сигнал, по его величине судят о дефекте [13, 14]. Этот метод имеет высокую чувствительность, но для обеспечения достоверности результатов поверхность изделия должна иметь хорошую чистоту обработки.

При индукционном методе (метод магнитного НК, основанный на регистрации магнитных полей объекта контроля индукционными преобразователями) [1] для регистрации магнитных полей рассеяния, образующихся около дефектов в намагниченной детали, используют катушку, которую двигают вдоль контролируемого объекта с посто-

янной скоростью. Магнитным полем детали в катушке наводится электродвижущая сила (ЭДС). В местах рассеяния поля ЭДС изменяется электрический сигнал, по которому судят о дефекте. Индукционный метод может использоваться для контроля сварных труб, перемещающихся относительно индукционной головки. При этом катушка намотана на сердечнике из металла с высокой магнитной проницаемостью - вместе они составляют магнитную индукционную головку (рис. 1). Метод отличается повышенной надежностью, может работать в сильных магнитных полях, однако требует перемещения магнитной головки с постоянной скоростью вдоль направления магнитного поля, при этом щель рабочего зазора в сердечнике должна быть перпендикулярна к направлению движения. Поэтому его рационально применять в массовом производстве (при большой длине швов).

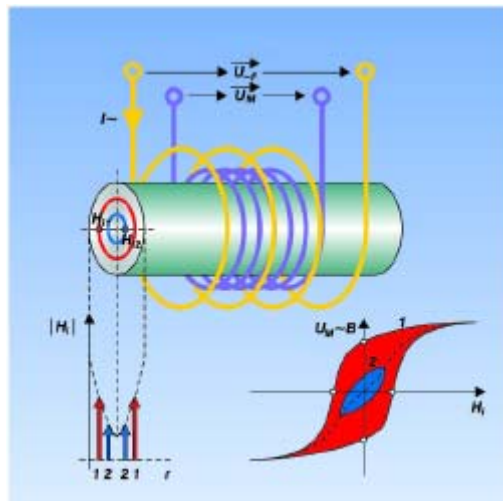


Рис. 1. Индукционный метод контроля труб

Другой вариант магнитно-индукционного способа контроля реализован, например, в приборе МАГНАТЕСТ ДН 3.623, созданным в институте др. Ферстера (Германия), предназначенном для контроля труб, прутков, проволоки, заготовок и т.д. в процессе производства. В данном приборе используется многочастотный метод и специальные алгоритмы обработки сигналов, что значительно повышает надежность результата контроля.

Дефектоскопы, у которых в качестве входного преобразователя используются индукционные и феррозондовые преобразователи, находят применение для автоматизированного контроля качества изделий из ферромагнитных материалов. Так, индукционный дефектоскоп типа ДИТ-1К предназначен для проверки труб диаметром 20... 102 мм

при скорости движения менее 4 м/с. Максимальная толщина стенки контролируемой трубы 6 мм. Особенностью дефектоскопа является использование бесконтактной поперечной системы намагничивания. Прибор обнаруживает поверхностные дефекты глубиной более 0,22 мм, а также подповерхностные дефекты труб.

Для контроля качества холоднокатанных и холоднотянутых труб диаметром 20... 102 мм предназначен индукционный дефектоскоп ДК, а для контроля холоднокатанных полос – дефектоскоп МД. На основе феррозондовых преобразователей созданы установки УФКТ-1М и МД-10Ф для контроля качества ферромагнитных изделий. С их помощью выявляются трещины, волосовины, раковины в стенках труб. Феррозондовый дефектоскоп типа МД-10Ф предназначен для контроля качества бесшовных труб диаметром 20... 146 мм с толщиной стенки менее 12 мм. В дефектоскопе имеются восемь вращающихся вокруг трубы феррозондовых преобразователей, сигналы которых, пропорциональные изменению магнитного поля дефектов, обрабатываются и регистрируются восьмиканальной аппаратурой с осциллографическим индикатором и блоком автоматики. Дефектоскоп управляет работой устройства сортировки труб.

Для полуавтоматического контроля качества поверхности и сварных соединений толстостенных ферромагнитных изделий разработаны феррозондовые установки «Радиян-1М» и «Магнетон-2М» [15]. Ряд феррозондовых магнитных дефектоскопов предназначен для контроля качества рельс, уложенных в пути. Работа дефектоскопов типа МРД основана на намагничивании в продольном направлении постоянным магнитом контролируемого участка рельса и считывании феррозондом поля дефекта.

2. Магнитные толщиномеры предназначены для измерения толщины различных покрытий на ОК из ферромагнитных материалов либо для измерения толщины ферромагнитных листов. В магнитных толщиномерах используется зависимость магнитного сопротивления участка магнитной цепи от зазора. По принципу действия магнитные толщиномеры можно разделить на три группы: магнитоотрывные (пондеромоторного действия), магнитостатические и индукционные [16]. Магнитоотрывной метод основан на измерении силы отрыва постоянного магнита или сердечника электромагнита от контролируемой поверхности, которая зависит от толщины покрытия. Метод применяют для неферромагнитных покрытий на деталях из ферромагнитных металлов при толщине покрытия до 1000 мкм и ферромагнитных покрытий на деталях из неферромагнитных металлов при

толщине покрытия до 25 мкм. Относительная погрешность метода $\pm 10\%$. Магнитоэлектрический метод основан на регистрации с помощью магниточувствительных элементов изменений напряженности магнитного поля в цепи электромагнита постоянного тока или постоянного магнита при изменении расстояния между ним и основным металлом детали из-за наличия покрытия. Метод применяют для ферромагнитных металлических и неметаллических покрытий и гальванических никелевых покрытий на ферромагнитных металлах. Относительная погрешность метода $\pm 10\%$. Магнитоиндукционный метод основан на определении изменений магнитного сопротивления участка цепи: преобразователь – контролируемая деталь, зависящего от толщины покрытия, по ЭДС, наводимой в измерительной обмотке преобразователя, питающегося переменным током низкой частоты [17]. Метод применяют для ферромагнитных металлических и неметаллических покрытий на ферромагнитных металлах. Относительная погрешность метода $\pm 5\%$.

Индукционные толщиномеры используют одностержневой магнитопровод и переменное электромагнитное поле (рис. 2).

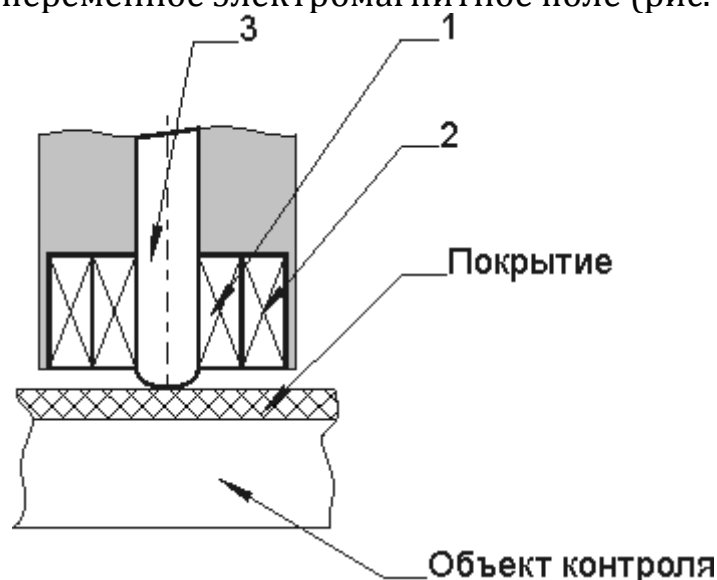


Рис. 2. Индукционный толщиномер

Сердечник - 3 расположен перпендикулярно поверхности объекта контроля. На нем размещены катушка, возбуждающая переменное электромагнитное поле 1, а также измерительная катушка 2. По такой схеме работает толщиномер МТ-201 предназначенный для измерения толщины немагнитных покрытий (хром, медь, краска, эмаль, пластик и т. д.) на ферромагнитном основании. Оригинальные модели немец-

кого производства Horstek TC 113 и TC 115, как и их аналог, толщиномер СНУ 113 и СНУ 115, обладают рабочими диапазонами в пределах 0-200 и 0-2000 мкм. В дискретном и непрерывном режимах толщиномер покрытий (Horstek TC 115 или магнитный толщиномер СНУ 115) позволяет работать не только со стальными деталями, но и немагнитными сплавами (алюминиевыми или латунными). При этом, материал подложки автоматически фиксируется на цифровом табло самого толщиномера лакокрасочных покрытий. Вдобавок, данный толщиномер лакокрасочных покрытий позволяет задавать верхнее и нижнее критические значения измеряемой толщины, сигнализируя звуковым сигналом при выходе измеряемой величины за их границы.

В тех случаях, когда металлоконструкции подвержены коррозии, обязательным условием оценки остаточного ресурса является оценка не только напряжённого состояния, но и остаточной толщины деталей металлоконструкций [18]. Для таких работ рекомендуется применять бесконтактные ЭМА толщиномеры.

3. Вопросами, связанными с магнитной структуроскопией, занимались в Японии, Германии, США. Но больше всего решением этих задач уделялось внимание в Советском Союзе. Из многочисленных методов физического контроля, применяемых для контроля механических характеристик распространился оптимальный – магнитный, а из магнитных методов предпочтительными оказались основанные на измерении магнитной индукции и коэрцитивной силы. Эти две магнитные характеристики имеют наилучшую корреляцию с механическими свойствами стали. Был разработан государственный стандарт по неразрушающему контролю механических свойств и микроструктуры магнитным методом [19], который является первым в мире стандартом по этому направлению. Магнитные методы исследования применяют как для определения величины магнитных свойств металлов и сплавов – коэрцитивной силы H_c , остаточной индукции B_r и магнитной проницаемости μ (используемых, например, в электромашиностроении и коррелирующих с такими характеристиками, как твердость, марка стали и т.д.), так и для изучения превращений протекающих в металлах и сплавах в твердом состоянии (например, механических напряжений) [20 – 25]. При этом полезную информацию можно получать, в зависимости от метода, как с полного сечения образца (изделия), так и с его поверхности.

Физическая суть метода давно известна и очень проста. Если снимать петлю магнитного гистерезиса с разных марок стали, можно увидеть, что магнитные характеристики разных марок позволяют

различать их как по магнитной индукции, так и по коэрцитивной силе, рис. 3.

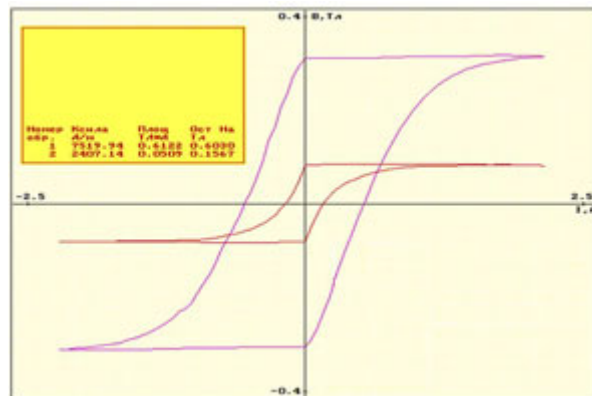


Рис. 3. Различия между петлями гистерезиса низкоуглеродистой (петля с меньшей площадью) и высокопрочной низколегированной стали, позволяющие определять структурные составляющие изделия и механические свойства.

Чтобы перейти от магнитного контроля стали к механическим испытаниям, для каждой марки стали проводят серию параллельных испытаний – магнитных и прямых, традиционных, а потом используют полученные взаимосвязи для аттестации готовой продукции.

Магнитными методами определяют глубину закаленного и цементированного слоев углеродистых сталей [26].

При магнитном контроле физико-механических свойств объектов используется связь между физико-механическими и магнитными параметрами [27]. Эта связь, часто не только неоднозначная, но и нестабильная, носит корреляционный характер и возникает тогда, когда одни и те же физические и химические процессы образования структуры и фазового состава ферромагнитных сталей формируют также и их магнитные свойства. Сложный характер одновременного влияния различных факторов на магнитные и физико-механические свойства ферромагнитных материалов часто не позволяет определить влияние каждого фактора в отдельности. Поэтому в магнитной структуроскопии оценивают изменение магнитных параметров и по ним определяют соответствующие этим изменениям различные физико-химические или физико-механические свойства ОК. При магнитном контроле механических характеристик и структуры ферромагнитных материалов используют относительные измерения, т. е. не измеряют какой-либо магнитный или механический параметр, а только фиксируют, соответствуют ли параметры ОК заданным или отклоняются от них. Чтобы оценить, насколько при этом механические параметры детали отличаются от номинальных, нужны дополнительные сопостав-

ления с параметрами специально подобранных образцов. В последнее время значительно вырос интерес специалистов к магнитостатическим методам контроля внешней поверхности объектов и соответствующим портативным ручным приборам. Данные методы неразрушающего контроля качества сооружений из конструкционных сталей основаны на изменении силы тока размагничивания, соответствующей коэрцитивной силе. В качестве примера можно привести, в частности, магнитные коэрцитиметры, определяющие качество термообработки, твердость и другие механические характеристики ферромагнитных материалов, или импульсные магнитные анализаторы, определяющие предел прочности, текучести и относительное удлинение углеродистых сталей после термообработки [28]. Интересны магнитные сканеры серии СкМ для поиска и определения параметров дефектов основного металла и металла сварных соединений.

По использованным магнитным информативным параметрам различают следующие разновидности контроля структуроскопии: коэрцитиметрия; контроль по остаточной намагниченности; контроль по магнитной проницаемости; контроль по магнитным шумам; ферритометрия; метод высших гармоник.

Для контроля структурного и напряженного состояния металлоизделия можно использовать как импульсные магнитные анализаторы (ИМА), так и коэрцитиметры. В настоящее время ИМА применяют только для сдаточного контроля металлопродукции. При контроле изделий в эксплуатации предпочитают двухполюсные коэрцитиметры. В отличие от ИМА, они позволяют выделить в изделии направления наибольших и наименьших напряжений.

За десятилетия работы в металлургии накоплены данные по величине коэрцитивной силы стального проката, в зависимости от марки стали и термической обработки, часть этих сведений вошла в справочник [29].

Вслед за металлургами магнитный контроль структурного и напряженного состояния металлоконструкций стали использовать для оценки состояния опасных элементов грузоподъемных механизмов [30]. Госгортехнадзор сформулировал требования к средствам магнитного контроля опасных производственных объектов. Госгортехнадзором России для определения НДС и остаточного ресурса металлоконструкций промышленного оборудования рекомендован коэрцитиметр КРМ-Ц-К2М. Принцип работы прибора основан на предварительном намагничивании изделия до насыщения, размагничивании его до нуля и электронной обработке полной петли магнитного гис-

терезиса с оценкой величины коэрцитивной силы H_c . Для количественной оценки напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса участка ферромагнитной конструкции после предварительного намагничивания доступной контролю поверхности, разработаны также устройства типа «Комплекс-2.05». Кроме того, в последние годы внедряются контактные сканирующие устройства индикации местонахождения зон концентрации напряжений (аномалий напряженно-деформированного состояния) ферромагнитных материалов без предварительного намагничивания с использованием так называемого «метода магнитной памяти металла» [31-33] - одно- или двухканальные магнитометры ИКН-1М, ИМНМ-1Ф. Однако, в отличие от первых, где размагничиваемость предварительно намагниченного участка контролируемого объекта обусловлена, прежде всего, действием механических напряжений, так как эта зона находится под «особым контролем» - обычно намагниченная зона помечается визуально, во втором случае однозначно трактовать причину резкой неоднородности остаточной намагниченности объекта контроля, строго говоря, - нельзя. Эту неоднозначность несколько снимает контроль по коэрцитивной силе, но и этот вопрос требует существенной проработки и проведения дополнительных исследований.

В отличие от магнитной дефектоскопии, имеющей дело с реальными дефектами, структурный магнитный контроль предназначен для упреждения развития дефектов, вызванных статическим нагружением, циклическими нагрузками и динамическими ударами [34-38].

Метод магнитных шумов, основан на эффекте Баркгаузена (скачкообразном изменении намагниченности ферромагнетика при непрерывном изменении внешних условий, например магнитного поля) [39 - 41]. Следует отметить, что применение метода магнитных шумов (МШ) в промышленности явно не соответствует его возможностям и требует комплексного решения исследовательских, конструкторских и методических задач. К их числу относятся вопросы более глубокого исследования взаимосвязи параметров сигналов магнитных шумов с технологическими остаточными напряжениями и структурными изменениями в конструкционных сталях, методическое обеспечение выбора информативных параметров и режимов контроля с наибольшей достоверностью результатов измерений, разработка принципов создания надежной контрольно-измерительной аппаратуры и методик контроля, приемлемых для производственных условий. Энергетические и эмиссионные характеристики МШ определяются

перестройкой магнитной текстуры ферромагнетика скачками Баркгаузена (СБ), и несут информацию об изменении физико-механических свойств металла в процессе технологии изготовления изделий.

4. Магнитные методы, так же как и рентгенографические, служат для получения данных о структуре веществ [42]. Эти методы использовались для изучения эффективной дисперсности парамагнитных окислов, таких, как Cr_2O_3 , нанесенная на Al_2O_3 , а также для определения степени окисления и типа связи в условиях, когда применение других методов затруднительно или совсем невозможно [43].

Фазовый состав матрицы сталей оказывает существенное влияние на свойства металла. В соответствии с этим знание количественного соотношения фаз, составляющих твердый раствор, является важной характеристикой, позволяющей оценить состояние металла в процессе производства и эксплуатации. К наиболее распространенным магнитным методам определения фазового состава матрицы стали можно отнести магнитные методы (ферритометрия, аустенитометрия). Это методы контроля доведенные до уровня нормативных документов. Их широко используют при неразрушающем контроле за их простоту, высокую производительность и возможность определения содержания ферритной фазы непосредственно в готовых изделиях, а также высокой точностью этих методов и соответствующей аппаратуры [44]. Оперативность, невысокая стоимость оборудования, простота процедуры измерения и возможность проведения измерения непосредственно на изделии (оборудование, трубопроводы, сварные соединения) делают этот метод незаменимым в производственных условиях в качестве метода контроля. Наличие достаточного числа нормативных документов, касающихся методики измерения, способствует проведению количественного определения фаз матрицы магнитным методом. Ферритометр - толщиномер магнитный ФТМ-2.

Магнитные методы анализа газов в последнее время привлекают к себе непрерывный интерес, выразившийся в появлении большого количества статей, обсуждающих способы исследования парамагнитных газов, особенно кислорода. Магнитные методы газового анализа основаны на измерении физических свойств газовой смеси или параметров физических явлений, обусловленных магнитными свойствами определяемого компонента в магнитном поле [45]. Магнитные методы нашли широкое применение для построения газоанализаторов на кислород, магнитная восприимчивость которого на два порядка превышает восприимчивость других газов. Магнитные методы час-

то позволяют установить степень окисления. Магнитные методы анализа разработаны сравнительно недавно. Первый газоанализатор, основанный на измерении теплопроводности газа в магнитном поле, был создан Рейном в 1939 г. В эти же годы Клауэр, Туровский и Вольф предложили метод, использующий явления термомагнитной конвекции. В 1946 г. П. Л. Капицей и одновременно в США Полингом был предложен магнитомеханический метод анализа. Магнитные методы анализа делятся на магнитомеханические, термомагнитные и магнитофизические.

Магнитные методы пригодны также для идентификации и определения ферромагнитных компонентов, например карбида железа, в катализаторах синтеза по Фишеру – Тропшу или синтеза аммиака. Магнитные методы совместно с другими методами исследования помогают решать вопросы строения, характера хим. связи, валентных состояний элементов в соединениях, ассоциации и полимеризации молекул. Эти методы используются при изучении гетерогенного катализа, диаграмм состояния и для характеристики чистоты вещества. Магнитные методы исследования применяются для изучения катализаторов уже в течение приблизительно тридцати лет.

Магнитные методы находят широкое применение в решении проблем химии, металлургии и геологии. Магнитные измерения используются для решения самых различных вопросов, например для определения молекулярной структуры, состояния окисления, строения координационных соединений, при разработке теории кристаллического состояния, коллоидной химии, свободных радикалов, при изучении структуры сплавов, диаграмм состояния, в геофизических исследованиях.

5. Распространению магнитных методов контроля способствовала недоступность поверхности некоторых объектов контроля (например, трубопроводов, уложенных в землю) и трудоемкость подготовки к контролю поверхности металла действующих объектов, особенно нефтегазовой промышленности с применением традиционных методов, например, УЗ-дефектоскопии. Их актуальность связана с высокой производительностью, точностью, информативностью и главным образом с возможностью бесконтактного проведения контроля. Широко распространен магнитный метод снарядами-дефектоскопами после предварительного намагничивания трубопровода. В пользу магнитного метода также свидетельствует его низкая избирательность к типу дефекта: какого бы происхождения ни был дефект, он будет выявлен. Для контроля металла на скрытых участках линейной

части магистральных газонефтепродуктопроводов предназначен магнитный интроскоп МИ-20/МИ-10 серии МИ-XX, применяемый согласно [46].

В научной литературе имеются описания теоретических предпосылок возможности применения магнитных геофизических методов для бесконтактного выявления дефектов металла внутри промышленных подземных трубопроводов. По опубликованным данным, технические средства для магниторазведки (ММ-60, УПК; ИГА-1У; ММ-60М1; ММП-203МС; ЭРА-трасса) на основании известных теоретических положений позволяют выполнить некоторые диагностические задачи. В частности, устанавливается глубина залегания ферромагнитных конструкций; с известными допущениями вычисляются магнитные аномалии, создаваемые намагниченными телами простой формы.

Принципиальный шаг вперед в области методов магнитного неразрушающего контроля был сделан после изобретения Е.М. Беловым «Способа прогнозирования местоположения течей трубопроводов», позволяющего выявлять аномальные участки трубопровода с поверхности земли за счет бесконтактного измерения его магнитного поля. На базе этого способа реализовано техническое устройство ИАМ-1. Из публикаций о результатах применения данного прибора можно сделать вывод о его достаточной эффективности в качестве индикатора аномальных участков трубопровода с отклонениями уровня напряженно-деформированного состояния металла от фоновых значений. Однако методические основы обследования указанным прибором для выявления точного местоположения, вида и опасности дефектов металла в печати или в нормативных документах не отражены и не могут быть проанализированы. Недостатком метода является отсутствие системы автоматической регистрации с заданным шагом, т.е. появляется зависимость от человеческого фактора. Эффективность применения данной технологии может быть оценена широким кругом специалистов по НК лишь при публикации достаточно обширной статистики вскрытий по результатам обследований.

По существующей системе классификации вышперечисленные технические средства бесконтактной магнитной диагностики относятся к ручным (неавтоматизированным) средствам. Технические средства НК данной группы зависят от степени участия оператора в процессе контроля. Фактически перечисленные методы и приборы являются инструментами качественной оценки состояния труб для прогноза возможного наличия дефектов металла на участках, вы-

бренных по индикаторным показаниям приборов на основе опыта специалиста, проводящего обследование. В этом случае надежность результатов в значительной мере зависит от субъективных факторов: квалификации, опыта и добросовестности оператора. Для повышения качества работ по бесконтактному обследованию в НТЦ «Транскор-К» разработан полуавтоматический прибор магнитометр бесконтактный сканирующий «СКИФ» МБС-04, лишенный указанных недостатков. Эта технология магнитного контроля согласно классификации методов НК относится: по виду - к магнитному контролю; по характеру взаимодействия физических полей - к магнитному методу; по первичному информативному параметру - к методам контроля намагниченности ферромагнитного объекта; по способу получения первичной информации - к магнитометрическим методам. Метод позволяет бесконтактно выявлять точное местонахождение (в продольных, угловых и абсолютных географических координатах), вид и опасность дефектов металла при 100%-ном объеме контроля трубопровода [47]. Кроме того, данный метод позволяет оценить работоспособность участков трубопровода с учетом совокупности всех имеющихся дефектов различной природы или повышения уровня напряженно-деформированного состояния металла труб. Эффективность выявления дефектов металла при этом не ниже 80%, что сопоставимо с показателями внутритрубной инспекции.

Литература

1. ГОСТ 24450-80. Контроль неразрушающий магнитный. Термины и определения.
2. ГОСТ 26697-85. Контроль неразрушающий. Дефектоскопы магнитные и вихре-токовые. Общие технические требования.
3. ГОСТ 21105-87. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод.
4. РД 13-05-2006. Методические рекомендации о порядке проведения магнитопорошкового контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах.
5. Зацепин Н.Н., Коржова Л.В. Магнитная дефектоскопия.- Минск: Наука и техника, 1981.- 208 с.
6. Янус Р.И. Магнитная дефектоскопия. - М. – Л.: ОГИЗ, 1946. – 171 с.
7. Алешин Н.П., Щербинский В.Г. Радиационная, ультразвуковая и магнитная дефектоскопия металлоизделий. – М.: Высш. шк., 1991. – 271 с.
8. Контроль качества сварки / Под общ. ред. В.Н.Волченко. - М.: Машиностроение, 1975. – 328 с.
9. Ключев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник. - М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.

10. ГОСТ 26178-84. Ленты магнитные. Методы испытания физико-механических свойств.
11. ГОСТ 25225-82. Контроль неразрушающий. Швы сварных соединений трубопроводов. Магнитографический метод.
12. ГОСТ 21104-75. Контроль неразрушающий. Магнитоферрозондовый метод.
13. Зацепин Н.Н. Неразрушающий контроль (избранные вопросы теории поля).- Мн: Наука и техника, 1979.- 192 с.
14. Зацепин Н.Н., Горбаш В.Г. Феррозондовые преобразователи с поперечным возбуждением. - Мн. Наука и техника, 1988.- 110 с.
15. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. - М.: Машиностроение. Оборудование для сварки. Т. IV-6 /В.К. Лебедев, С.И. Кучук-Яценко, А.И. Четвертко и др.; Под ред. Б.Е. Патона. 1999. - 496 с.
16. ГОСТ 26737-85. Контроль неразрушающий. Толщиномеры покрытий магнитные и вихретоковые. Общие технические требования.
17. ГОСТ 27750-88. Контроль неразрушающий. Покрытия восстановительные. Методы контроля толщины покрытий.
18. ГОСТ 9.302-88. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля.
19. ГОСТ 30415-96. Сталь. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры металлопродукции магнитным методом.
20. Мельгуй М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей. – Минск: Наука и техника, 1980. – 184 с.
21. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. М.: Наука, 1993. - 252 с.
22. Бида Г.В., Ничипурук А.П. Коэрцитиметрия в неразрушающем контроле. Дефектоскопия, - 2000, - № 10, - С. 3-27.
23. Бида Г.В., Горкунов Э.С., Шевнин В.М. Магнитный контроль механических свойств проката. - Екатеринбург: УрО РАН, 2002. - 252 с.
24. Матюк В.Ф., Гончаренко С.А., Хартманн Х., Райхельт Х. Современное состояние неразрушающего контроля механических свойств и штампуемости листового проката сталей в технологическом потоке производства. - Дефектоскопия, 2003, № 5, с. 19-60
25. Сандомирский С.Г. Современные возможности магнитного контроля структуры изделий // В мире неразрушающего контроля. - 2009. - №1.
26. Матюк В.Ф., Осипов А.А., Кратиров В.Б. Определение толщины упрочненного слоя по изменениям формы петли гистерезиса. - Дефектоскопия, 1997, № 9, с. 32-41
27. Щербин В.Е., Горкунов Э.С. «Магнитный контроль качества металлов», Екатеринбург, 1996 г.
28. Матюк В.Ф., Мельгуй М.А., Кратиров В.Б., Делендик М.Н., Осипов А.А., Кулагин В.Н. Новый прибор для измерения коэрцитивной силы. – В кн.: Материалы международной научно-технической конференции «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов». – Могилев. 2004. – С. 122-123.
29. «Неразрушающий контроль и диагностика», РОНКД под редакцией В.В. Ключева в 2004 г.

30. РД ИКЦ «КРАН»- 007-97/02) Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса подъемных сооружений при проведении их обследования и техническом диагностировании (экспертизе промышленной безопасности).
31. ОСТ Р ИСО 24497-1-2009. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Часть 1. Термины и определения.
32. ГОСТ Р ИСО 24497-2-2009. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Часть 2. Общие требования.
33. ГОСТ Р ИСО 24497-3-2009. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Часть 3. Контроль сварных соединений.
34. ГОСТ Р 52330-2005. Контроль неразрушающий. Контроль напряженно-деформированного состояния объектов промышленности и транспорта. Общие требования.
35. ГОСТ Р 53006-2008. Оценка ресурса потенциально опасных объектов на основе экспресс-методов. Общие требования.
36. Костин В.П., Осинцев А.А., Шашков А.П., Царькова Т.П. Многопараметровые методы структуроскопии стальных изделий с использованием магнитных свойств вещества. Дефектоскопия. 2004. с. 69-82.
37. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник: в 2-х кн. / Под ред. В.В. Ключева. М: Машиностроение, 1986.
38. Гордиенко, В.Е. Пассивный феррозондовый контроль структуры металла и внутренних напряжений в элементах сварных МК / В.Е. Гордиенко; СПбГАСУ. – СПб., 2010. – 83 с.
39. Ломаев Г.В., Мерзляков Ю.М., Эффект Баркгаузена.- Ижевск: изд-во ИжГТУ 2004.- 164 с.
40. Ломаев Г.В., Каримова Г.В. Датчики Баркгаузена: монография – Ижевск: изд-во ИжГТУ, 2008. – 368 с.
41. Бусько В.Н. Венгринович В.Л. Макаров А.В. К вопросу о контроле лазерно-упрочненных слоев методом эффекта Баркгаузена // Материалы II Международной научно-практической конференции «Инженерия поверхностного слоя деталей машин». Минск: БНТУ, 2010. С. 243-245.
42. Глебов А.Н., Буданов А.Р. Магнетохимия: Магнитные свойства и строение веществ // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 7. С. 44-51.
43. Кузнецов И.А. Магнитный структурный анализ.(учебное пособие). – Свердловск, Уральский государственный университет. 1984. С.118.
44. ГОСТ 11878-66 - Сталь аустенитная. Методы определения содержания ферритной фазы в прутках.
45. В.П. Тхоржевский Автоматический анализ химического состава газов. 1969 г., 324 с.
46. «Инструкции по магнитному контролю линейной части магистральных газонефтепродуктопроводов», М., ВНИИГАЗ, 2001.
47. РД 102-008-2002 Инструкция по диагностике технического состояния трубопроводов бесконтактным магнитометрическим методом.

Статья поступила в редакцию 30.05.11

**ИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР ПОДГОТОВКИ УНИТАРНОГО
ПРЕДПРИЯТИЯ «БЕЛГАЗПРОМДИАГНОСТИКА»**
*The Engineering Training center of the Unitary Enterprise
«Belgazpromdiagnostika»*

Какошко Е.Ю., Левчук В.А., Тарасевич Е.В.
Kakoshko Elena, Levchuk Vladimir, Tarasevich Ekaterina

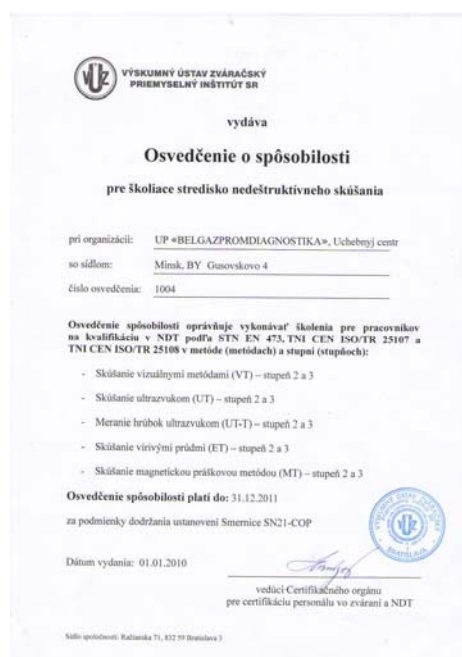
Представлена история развития Центра, приведены разрешительные документы. Рассмотрены области его деятельности, структура предприятия и партнеры.

The history of the center development and licensing documents are produced. Fields of its activities, the structure of the enterprise and partners are considered.

Для сохранения преемственности, многолетних традиций и опыта подготовки в Республике Беларусь высококвалифицированных кадров в области неразрушающего контроля и технической диагностики в апреле 2009 года в УП «Белгазпромдиагностика» на базе учебного отдела ЗАО «ОС-Сертико» (ранее: «Профсертико», СП «ЛОН-МИ», УО «СТК») был образован инженерно-учебный отдел, впоследствии переименованный в Инженерный Центр подготовки.

С апреля 2009 года Инженерный Центр подготовки УП «Белгазпромдиагностика» по Соглашению с Органом по сертификации Белорусского государственного института повышения квалификации и переподготовки кадров по стандартизации, метрологии и управлению качеством является признанным центром подготовки специалистов для целей сертификации персонала в области неразрушающего контроля в Республике Беларусь на 1-й, 2-й и 3-й уровни квалификации.

С января 2010 года, по результатам аудиторской проверки Органа по сертификации Европейского Союза, Инженерный Центр подготовки УП «Белгазпром-



диагностика» получил Свидетельство о признании в качестве Учебного центра Сертификационного органа по сертификации персонала в области сварки и неразрушающего контроля – Промышленного института сварки Словацкой Республики (Братислава). Этим Свидетельством Орган по сертификации подтверждает соответствие ISO/TR 25107, ISO/TR 25108 организационных и технических возможностей Инженерного Центра подготовки УП «Белгазпромдиагностика» по осуществлению подготовки специалистов, в соответствии с EN 473, на 2-й и 3-й уровни компетентности.

Инженерный Центр подготовки осуществляет подготовку специалистов к сертификационным испытаниям по белорусским (СТБ EN 473) и европейским (EN 473) нормам на второй и третий уровни компетентности по визуальному (VT), магнитопорошковому (MT) и феррозондовому, ультразвуковому (UT), вихретоковому (ET), вибродиагностическому (VDT) методам неразрушающего контроля, а также контролю герметичности (LT) и ультразвуковой толщинометрии (UT-T).

В стадии разработки находятся следующие перспективные направления: акустико-эмиссионный метод (АТ), метод фазированных решеток, дифракционно-временной метод (TOFD), определение напряженно-деформированного состояния методом измерения коэрцитивной силы, измерение твердости, а также механические испытания.

В 2009 году в Инженерном Центре подготовки 241 человек прошел подготовку к сертификации, в 2010 году – 263 человека.

Подготовка проводится как на базе УП «Белгазпромдиагностика», так и на базе предприятий-заказчиков.

Кроме того, Центр осуществляет свою деятельность в области:

- организации и проведения тематических семинаров по метрологическому, информационному и организационному обеспечению деятельности в области измерений, испытаний, неразрушающего контроля и технической диагностики;

- разработки, по заявкам заказчиков, методик выполнения измерений (МВИ), технологических инструкций по различным методам контроля;

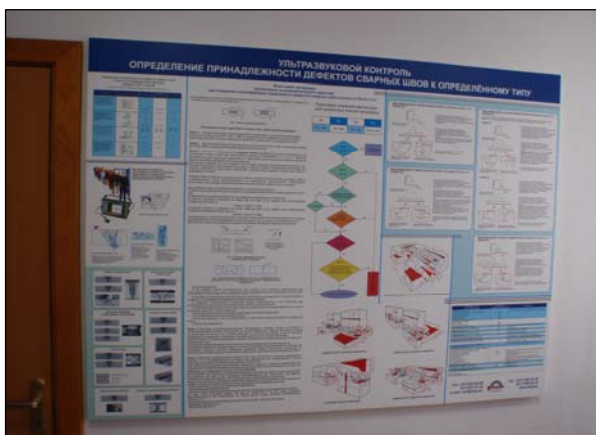
- оказания консалтинговых услуг по различным вопросам в области неразрушающего контроля и технического диагностирования;

В ОРГАНИЗАЦИЯХ НК И ТД

- проведения тренингов по применению современных технологических методик и использованию новых образцов оборудования.



Прочная основа такого разнообразия методов неразрушающего контроля, по которым проводится подготовка, заложена в самой структурной организации предприятия. УП «Белгазпромдиагностика» является крупнейшим в Республике Беларусь поставщиком оборудования и материалов для различных видов неразрушающего контроля и технической диагностики, имеет в своем составе две аккредитованные испытательные лаборатории, в штате которых высококвалифи-



цированный инженерно-технический персонал, которые оснащены самым современным оборудованием, программным обеспечением и обширным фондом технической нормативной, справочной и методической документации. Это позволяет в процессе подготовки специалистов как применять самые современные образцы контрольно-измерительного оборудования, так и использовать накопленный опыт выполнения контроля и измерений, методические разработки по самому широкому спектру видов, методов неразрушающего контроля.

Привлечение высококвалифицированных преподавателей с большим опытом работы, имеющих квалификацию второго и третьего уровня компетентности в соответствии с требованиями СТБ ЕН 473 (EN 473), опытных организаторов и менеджеров в области профессиональной подготовки специалистов неразрушающего контроля, служит дополнительной гарантией высокого качества подготовки.

Наши партнеры:

- TÜV SÜD AG, Германия, Мюнхен;
- Орган по сертификации персонала Европейского Союза - Промышленный институт, Словацкая Республика, Братислава;
- Орган по сертификации персонала УО «Белорусский государственный институт повышения квалификации и переподготовки кадров по стандартизации, метрологии и управлению качеством», Республика Беларусь, Минск;
- Белорусская ассоциация неразрушающего контроля и технической диагностики (БАНКиТД), Республика Беларусь, Минск;
- Научно-промышленный союз «Управление рисками, промышленная безопасность, контроль и мониторинг» (РИСКОМ), Россия, Москва;
- Научно-учебный центр «Качество», Россия, Москва;
- Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев;
- Белорусско-Российский Университет, Республика Беларусь, Могилев;
- Компания НДТ Инжиниринг, Республика Беларусь, Минск;
- Объединенная сварочная компания, Республика Беларусь, Минск;
- Журнал «Сварщик в Белоруссии», Республика Беларусь, Минск.

Статья поступила в редакцию 26.05.11

Четвёртый Республиканский конкурс специалистов НК – состоялся!

Филиппов К.А.

*председатель жюри Республиканского конкурса
по неразрушающему контролю на присвоение звания
«Лучший специалист неразрушающего контроля Республики Беларусь»*

27 мая 2011 года в г. Минске подведены итоги IV-го Республиканского конкурса на присвоение звания «Лучший специалист по неразрушающему контролю Республики Беларусь 2011 года».

Трудно недооценивать значимость неразрушающего контроля (НК) в современном мире. Его результаты важны как на первом этапе, т.е. при изготовлении элементов и узлов технических устройств, оборудования и сооружений, предназначенных для эксплуатации в том числе и на потенциально опасных производственных объектах, так и на последующих этапах – при монтаже оборудования, его ремонте, реконструкции и модернизации. Особенно важна роль неразрушающего контроля при продлении назначенного срока службы (назначенного ресурса) объектов контроля в условиях продолжающегося процесса старения основных производственных фондов промышленных предприятий. Минимизация возможных последствий старения производственных фондов достигается за счет диагностики технического состояния оборудования.

С каждым годом в помощь человеку для определения технического состояния основного металла и сварных соединений технических устройств, оборудования и сооружений предлагается всё большее количество современных научных разработок и наукоёмких технологий, а изготовителями оснастки предлагается всё более и более совершенное оборудование, многообразие возможностей которого даже невозможно было себе представить десять лет назад. Осваиваются и внедряются в практику новые методы неразрушающего контроля и технического диагностирования: вихретоковый контроль, акустическая эмиссия, коэрцитиметрия и др. Совершенствуются старые – ультразвуковой контроль качающимся лучём на базе фазированных решёток и пр.

Связано это как с прорывом информационных технологий обработки результатов измерения исследуемых полей (мультимедийность) в реальном масштабе времени, так и с совершенствованием

электронной базы и первичных средств измерений. Но на конечном этапе, т.е. этапе принятия окончательного решения, всё равно остаётся человек. Отметим, что специфика неразрушающего контроля теплоэнергетического оборудования и объектов химического машиностроения заключается, прежде всего, в отсутствии достаточно комфортных условий его проведения (работа с лесов и подмостей, в замкнутом пространстве, при работающем рядом оборудовании), при жёстких требованиях к надёжности и повторяемости результатов обследования, ограниченности материальных затрат и сжатых временных сроков проведения планово-предупредительных ремонтов. Поэтому квалификации персонала, занимающегося выполнением неразрушающего контроля, уделяется всё большее и большее значение.

К неразрушающему контролю основного металла и сварных соединений технических устройств, оборудования и сооружений, допускаются специалисты, прошедшие специальную теоретическую подготовку, практическое обучение, подтверждение квалификации и сертификацию в соответствии с государственным стандартом СТБ ЕН 473 «Квалификация и сертификация персонала в области неразрушающего контроля. Общие требования». Но это только подтверждение квалификации, а где стимул для её повышения?

Вот в качестве такого, на мой взгляд, очень мощного стимула и был задуман и проведён уже в четвёртый раз Республиканский конкурс на присвоение звания «Лучший специалист по неразрушающему контролю Республики Беларусь».

В конечном итоге – страна должна знать своих героев!

Как же это всё начиналось? В мае 2006-го года я был приглашён в жюри 2-го Республиканского конкурса сварщиков. Во время проведения конкурса ко мне подошёл начальник лаборатории металлов Светлогорской ТЭЦ Михаил Иванович Евзрезов и резонно спросил: «Почему у сварщиков уже второй конкурс, а у нас (специалистов НК) нет никакого?»

Мысль засела глубоко – действительно, почему? Впоследствии сформировалась в идею. В сентябре 2006 года состоялась беседа с заместителем начальника департамента Госпромнадзор Слободчиковым М.В. Идея ему очень понравилась, ведь повышение квалификации персонала по неразрушающему контролю это, в конечном итоге, надёжная и безопасная эксплуатация опасных производственных объектов. Вот так с лёгкой руки Михаила Владимировича Слободчикова и была выписана путёвка в жизнь конкурсу специалистов по неразрушающему контролю. Уже потом был поиск партнёров, инфор-

мационных спонсоров, кропотливое создание положения о конкурсе и его реализация. Затем проведение первого конкурса, потом второго, третьего...

Вот выдержка из положения и порядка проведения конкурса:

«Департамент по надзору за безопасным ведением работ в промышленности Министерства чрезвычайных ситуаций (Госпромнадзор); Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ГНУ ИПФ НАН Беларуси); Белорусская ассоциация неразрушающего контроля и технической диагностики (БАНКиТД); при информационной поддержке журнала «Промышленная безопасность» проводят Республиканский конкурс на присвоение звания «Лучший специалист неразрушающего контроля Республики Беларусь» текущего года.

Целью конкурса является повышение уровня подготовки и обмен опытом специалистов в области неразрушающего контроля. Координацию работ по проведению Республиканского конкурса по неразрушающему контролю осуществляет Служба контроля качества ООО «Научно-производственная компания «Сфера промышленной безопасности»....»

Кстати, есть и более прозаичные, но совсем не маловажные итоги прошедших ранее конкурсов на присвоение звания «Лучший специалист неразрушающего контроля Республики Беларусь». Так, например, по итогам 3-го конкурса специалисту Храмцову Николаю Васильевичу (занявшему 2-ое место в номинации «визуальный и измерительный контроль») была повышена премия «за классность» до максимума. Bravo руководству Гомельской ТЭЦ-2!

А теперь, и это уже история – четвёртый конкурс состоялся!

Конкурс проводился по семи номинациям – видам (методам) НК:

1. визуальный и измерительный контроль;
2. вихретоковый контроль;
3. капиллярный контроль;
4. магнитопорошковый контроль;
5. радиографический контроль;
6. ультразвуковая толщинометрия;
7. ультразвуковой контроль.

В каждом виде (методе) НК участникам конкурса необходимо было сдать теоретические экзамены и проверить один образец. При сдаче практического экзамена по виду (методу) «радиографический

контроль» необходимо было расшифровать пять плёнок, а по методу «ультразвуковая толщинометрия» необходимо было измерить толщину 25-ти образцов изготовленных из разного материала (нержавеющая сталь, латунь, плексиглаз, медь, алюминий).

Проходил конкурс на базе двух предприятий: ООО «Научно-производственная компания «Сфера промышленной безопасности» и ГНУ «Институт прикладной физики Национальной Академии Наук Беларуси».

По каждому виду (методу) выявлялись победители и присваивались грамоты. Не обошлось и без приятных неожиданностей. Учитывая одинаковое количество баллов, которое набрали специалисты, были присуждены и два первых места, и два вторых. По итогам соревнований в каждом виде (методе) неразрушающего контроля определялся победитель Республиканского конкурса по общей сумме баллов, набранных им во всех номинациях.

Всем организациям, направившим своих специалистов на конкурс, вручен диплом участника IV-го республиканского конкурса по неразрушающему контролю на присвоение звания «Лучший специалист неразрушающего контроля Республики Беларусь 2011 года».

Всем физическим лицам (участникам конкурса) вручен диплом участника IV-го республиканского конкурса по неразрушающему контролю на присвоение звания «Лучший специалист неразрушающего контроля Республики Беларусь 2011 года».

Специалистам, занявшим 1-е, 2-е или 3-е места по каждому виду (методу) неразрушающего контроля, вручены грамоты IV-го Республиканского конкурса по неразрушающему контролю и подарки.

Специалистам, признанным победителями и получившим звание «Лучший специалист неразрушающего контроля Республики Беларусь 2011 года», т.е. занявшим 1-е, 2-е или 3-е место в общем зачёте, вручены почетные грамоты и ценные призы.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО – участие в IV-ом Республиканском конкурсе по неразрушающему контролю на присвоение звания «Лучший специалист неразрушающего контроля Республики Беларусь 2011 года» засчитывается ВСЕМ участникам (физическим лицам), успешно сдавшим экзамены, как прохождение обязательной периодической аттестации, согласно требованиям п.п. 8.5÷8.9 технического кодекса установившейся практики ТКП 054-2007 (02300) «Техническое диагностирование и продление назначенного ресурса (назначенного срока службы) безопасной эксплуатации технических устройств, оборудо-

вания и сооружений на опасных производственных объектах. Общие положения» и выдается соответствующее удостоверение.

Результаты теоретического и практического экзаменов, полученные специалистами-участниками IV-го Республиканского конкурса по неразрушающему контролю на присвоение звания «Лучший специалист неразрушающего контроля Республики Беларусь 2011 года», признаются основой для межлабораторных сличений согласно требованиям СТБ ИСО/МЭК 17025.

И вот они – победители четвёртого Республиканского конкурса на присвоение звания «Лучший специалист неразрушающего контроля Республики Беларусь 2011 года»:

- вид (метод) НК **«визуальный и измерительный контроль»**
1-ое место ГАРБУЗОВ Андрей Игоревич – филиал ОАО «Химремонт» Транснефтедиагностика»;
2-ое место ПАВЛЕНКО Анатолий Григорьевич – ОАО «Управление механизации № 12»;
3-е место ЛЕШКОВ Олег Васильевич – ОАО «Белгорхимпром»;
- вид (метод) НК **«капиллярный контроль»**
1-ое место ДЕМЕНЧУК Игорь Николаевич – Минская ТЭЦ-5 РУП «Минскэнерго»;
2-ое место ХРАМЦОВ Николай Васильевич – Гомельская ТЭЦ РУП «Гомельэнерго»;
3-е место ЮЩЕНКО Александр Николаевич – ОАО «Гомельский химический завод»;
- вид (метод) НК **«ультразвуковой контроль»**
1-ое место БАРСУКОВ Роман Петрович – филиал ОАО «Химремонт» Транснефтедиагностика»;
2-ое место МИХНЁНОК Василий Павлович – ГП «ДИЭКОС»;
3-е место ХРАМЦОВ Николай Васильевич – Гомельская ТЭЦ РУП «Гомельэнерго»;
- вид (метод) НК **«радиографический контроль»**
1-ое место ВОРОБЬЁВ Дмитрий Павлович – РНУ «Белгазэнергоремонт» ОАО «Белтрансгаз»;
2-ое место АНДРЮШИН Денис Владимирович – РУП «Гомсельмаш»;
3-е место ЧЕРНЯВСКИЙ Юрий Олегович – ОАО «МАПИД»;

- вид (метод) НК **«ультразвуковая толщинометрия»**

1-ое место БУЛИЧ Алексей Сергеевич – Гомельские тепловые сети ОАО «Гомельэнерго»;

1-ое место ПОНОМАРЧУК Владимир Петрович – Гомельские тепловые сети ОАО «Гомельэнерго»;

2-ое место АНДРЮШИН Денис Владимирович – РУП «Гомсельмаш»;

3-е место ПАВЛЕНКО Анатолий Григорьевич – ОАО «Управление механизации № 12»;

3-е место ХРАМЦОВ Николай Васильевич – Гомельская ТЭЦ РУП «Гомельэнерго»;

- вид (метод) НК **«магнитопорошковый контроль»**

1-ое место ЧУМАЧЕНКО Светлана Геннадьевна – Минское вагонное депо УП «Минское отделение Белорусской ЖД»;

2-ое место ХРАМЦОВ Николай Васильевич – Гомельская ТЭЦ РУП «Гомельэнерго»;

- вид (метод) НК **«вихретоковый контроль»**

1-ое место ЧУМАЧЕНКО Светлана Геннадьевна – Минское вагонное депо УП «Минское отделение Белорусской ЖД».

Лучшими по итогам конкурса в общем зачёте по всем номинациям - видам (методам) неразрушающего контроля признаны следующие специалисты с присвоением звания **«Лучший специалист неразрушающего контроля Республики Беларусь 2011 года»**:

1-ое место АНДРЮШИН Денис Владимирович – РУП «Гомсельмаш»;

2-ое место ХРАМЦОВ Николай Васильевич – Гомельская ТЭЦ РУП «Гомельэнерго»;

1-ое место ПОНОМАРЧУК Владимир Петрович – Гомельские тепловые сети ОАО «Гомельэнерго».

Поздравляем от души!

Статья поступила в редакцию 01.06.11

КОНФЕРЕНЦИИ

Сентябрь 2011

ХІХ ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ

Конференция пройдет в период с 6 по 8 сентября 2011г. в г. Самара на базе Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева.

Темы конференции

В программе конференции рассматриваются основные методы неразрушающего контроля и технической диагностики по направлениям:

- I. ТЕХНОГЕННАЯ ДИАГНОСТИКА
- II. АНТИТЕРРОРИСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА
- III. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА
- IV. СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ, РИСКИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Тел.: 8 499 2455656

Факс: 8 499 2468888

E-mail: info@ronktd.ru

www.conf.ronktd.ru, www.ronktd.ru

Октябрь 2011

19-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ И ВЫСТАВКА «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ»

Конференция пройдет с 6 по 10 октября 2011 г. в г. Ялта.

Тел./факс: (+38 044) 573 30 40 (с 8.00 до 14.00)

Моб. тел.: 8-067-708 93 95

E-mail: office@conference.kiev.ua

Почтовый адрес: 02094, г. Киев, а/я 41, УИЦ "НТТ"

Ноябрь 2011

**4-я МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ПРИБОРОСТРОЕНИЕ – 2011»**

16 –18 ноября 2011 г., БНТУ, г. Минск

Организаторы:

Министерство образования Республики Беларусь,
Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь,
Национальная академия наук Беларуси,
Белорусский национальный технический университет,
Белорусский Государственный институт метрологии,
Институт прикладной физики НАН Беларуси.

Тематика конференции:

- Измерительные системы и приборы, технические средства безопасности.
- Методы исследований и метрологическое обеспечение измерений.
- Физические, физико-математические, материаловедческие и технологические основы приборостроения.
- Управление производством и подготовка специалистов для приборостроительной отрасли.

220013, Минск, пр-т Независимости, 65, БНТУ, Приборостроительный факультет.

Тел. +375 17 2939667,

e-mail: pribor@bntu.by.

Телефон для справок +375 17 2939667,

Елена Александровна Грабчикова



Баев Алексей Романович

Baev A.R.

доктор технических наук, профессор,
Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики
Национальной Академии Наук Беларуси»,
главный научный сотрудник
тел./факс (+375 17) 284 20 02, e-mail: baev@iaph.bas-net.by



Горбаш Владимир Григорьевич

V.G. Gorbash

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент.
Доцент факультета охраны труда и промышленной безопасности,
зав. лабораторией неразрушающего контроля МИПК и ПК БНТУ
220014 г. Минск, ул. Минина, 23, корп. 2.
Тел.: 8-017-310-42-81, 8-029-6462442 (velcom), e-mail: v_gorbash@tut.by



Делендик Михаил Николаевич

Delendick M.N.

кандидат технических наук,
доцент факультета охраны труда и промышленной безопасности,
начальник научно-исследовательского отделения МИПК и ПК БНТУ.
220014 г. Минск, ул. Минина, 23, корп. 2.
Тел.: 8-017-310-42-81, 8-044-7013847 (velcom), e-mail: del_minina@mirpk.by



Какошко Елена Юрьевна

Kakoshko Elena

Инженерный Центр подготовки УП «Белгазпромдиагностика»,
ведущий специалист
220073 Минск, ул. Гусовского, 4.
Тел.: 205-08-68, 298-88-48
E-mail: ek@diag.by



Коновалов Георгий Евменьевич

Kononov G.E.

кандидат технических наук
ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»,
ведущий научный сотрудник
220072, г. Минск, ул. Ф.Скорины, 16
Тел.: (+375 17) 284 20 02, e-mail: kononov@iaph.bas-net.by



Левчук Владимир Александрович

Levchuk Vladimir

Инженерный Центр подготовки УП «Белгазпромдиагностика»,
инженер-дефектоскопист
220073 Минск, ул. Гусовского, 4
Тел.: 205-08-68, 298-88-48
E-mail: cert@diag.by



Майоров Александр Леонидович

Mayorov A.L.

кандидат технических наук
ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»,
заведующий лабораторией
220072, г. Минск, ул. Ф.Скорины, 16
Тел.: (+375 17) 284 20 02, e-mail: mayorov@iaph.bas-net.by



Матюк Владимир Федорович
Matyuk V.F.

доктор технических наук
ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»,
заведующий лабораторией
Тел. (017) 284-18-55,
e-mail: matyuk@iaph.bas-net.by



Осипов Александр Александрович
A.A. Osipov

кандидат технических наук
ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»,
ведущий научный сотрудник
220072, г. Минск, ул. Ф.Скорины, 16
Тел.: +(375-17) 284-24-17, e-mail: osipov@iaph.bas-net.by



Павленко Павел Николаевич
Pavlenko P.N.

старший преподаватель факультета охраны труда и промышленной
безопасности МИПК и ПК БНТУ, старший инженер лаборатории
неразрушающего контроля МИПК и ПК БНТУ
220014 г. Минск, ул. Минина, 23, корп. 2
Тел.: 8-017-310-42-81, 8-029-3499541 (velcom)



Парадинец Валерий Васильевич
Paradinets V.V.

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»,
научный сотрудник
220072, г. Минск, ул. Ф.Скорины, 16
Тел.: (+375 17) 284 20 02, e-mail: pvv_rb@iaph.bas-net.by



Тарасевич Екатерина Васильевна
Tarasevich Ekaterina

Начальник Инженерного Центра подготовки УП «Белгазпромдиагно-
стика»
220073 Минск, ул. Гусовского, 4
Тел.: 205-08-68, 298-88-48
E-mail: cert@diag.by



Филиппов Константин Александрович

кандидат технических наук
ООО «Научно-производственная компания «Сфера промышленной
безопасности»,
зам. директора по качеству
Тел.: +375 17 213-29-31, +375 29 655-20-01

Правила для авторов
Белорусского электронного журнала “Наука”,
серия
Неразрушающий контроль и диагностика

Для публикации оригинальной статьи авторы должны представить в редакцию следующие материалы:

1. Авторское заявление с указанием контактной информации (в электронном и бумажном виде).

2. Направление от организации, в которой выполнялась работа (в бумажном виде на бланке организации). Направление не требуется, если работа выполнялась за рубежом.

3. Файл с текстом статьи в формате WinWord, а также в бумажном виде или в электронном в формате pdf. Если одновременно с русским текстом статьи по желанию авторов публикуется ее английский перевод, он представляется отдельно.

4. Файлы в формате WinWord с текстом аннотации на русском и английском языках. Перевод на английский язык осуществляется авторами. Каждая аннотация, кроме собственно текста, должна включать в себя заглавие статьи, фамилии и инициалы авторов, также на русском и английском языках.

5. Файл в формате WinWord, в котором следует указать информацию для Авторского указателя:

- на русском языке – сведения об авторах (фамилия, имя, отчество полностью, ученая степень, звание, должность, место работы, телефон, факс, адрес электронной почты и другая контактная информация по усмотрению автора);

- на английском языке – транслитерацию фамилий и имен авторов, а также название учреждений, где выполнялась работа.

6. Фотографии авторов в электронном виде для размещения в Авторском указателе. Фамилия автора должна входить в имя файла с фотографией.

Бумажные версии документов могут быть представлены в редакцию любым из следующих способов:

- отправлены по факсу редакции: **(+375 17) 284-17-40;**

- присланы обычной почтой или переданы непосредственно по адресу: 220072, г. Минск, ул. Академическая, 16, **Государственное предприятие «Диа-тех», редакция журнала БЭЖ «Наука».**

Электронные версии документов должны быть присланы в редакцию по электронной почте на адрес *info@science.by*.

К публикации в журнале «Неразрушающий контроль и диагностика» принимаются статьи, прошедшие рецензирование. Поступившая в редакцию рукопись направляется по выбору редакции на отзыв специалисту в данной области исследований. Решение о публикации принимается редакционной коллегией журнала на основании экспертных оценок рецензентов с учетом соответствия представленных материалов тематической направленности журнала, их научной значимости и актуальности. Рукопись, получившая отрицательные отзывы двух независимых рецензентов, решением редколлегии отклоняется.

Статьи должны быть написаны на русском (или английском) языке, отредактированы и оформлены в соответствии с нижеследующими требованиями.

Основной текст статьи

Каждая статья должна представлять собой файл, содержащий текст, набранный в редакторе WinWord, шрифт Cambria, кегль 14 пунктов, 1 интервал. При отсутствии инсталлированного шрифта Cambria допустимо использовать шрифт Times New Roman. Должен быть включен режим автоматического переноса.

Перед текстом статьи отдельной строкой в левом верхнем углу обязательно должен быть приведен код универсальной десятичной классификации (УДК) тематики статьи (шрифт – кегль 12).

Статья начинается с заголовка, который пишется строчными буквами полужирным шрифтом размером 16 пунктов. Далее следует список авторов в формате «фамилия, инициалы», который пишется полужирным шрифтом 14 пунктов. Имена авторов разделяются запятыми.

Текст аннотации в виде абзаца с выравниванием по ширине с отступами 12,5 мм справа и слева шрифтом 12 пунктов.

Страницы статьи не должны быть пронумерованы. Поля на странице должны быть: левое и правое – по 25 мм, верхнее – 30 мм, нижнее – 32 мм.

Графические иллюстрации

Таблицы, иллюстрации и подписи к ним размещаются в тексте статьи при первом их упоминании. При этом следует избегать использования опции «обтекание текста».

Таблицы снабжаются тематическими заголовками и нумеруются арабскими цифрами в порядке их упоминания в тексте. Все графы в таблицах должны иметь заголовки. Сокращение слов в таблицах не допускается. Все аббревиатуры должны быть расшифрованы в сносках к таблице.

Графики и схемы должны выполняться с помощью графического редактора CorelDraw. Использование графических средств Microsoft Office крайне нежелательно из-за частых искажений рисунков при верстке, преобразовании в pdf-формат и печати. Рисунки следует присылать в виде отдельных файлов с сохранением форматов, использованных для их создания. Недопустимо использовать при создании рисунков «волосяные» линии (1/4 пункта). Эти линии хорошо видны на экране монитора, но исчезают в печатной версии документа.

Фотографии представляются в виде отдельных файлов в форматах jpeg, tiff, bmp, png с разрешением 300-600 dpi.

Штриховые рисунки, выполненные от руки, должны быть отсканированы в режиме bitmap с разрешением не ниже 600 dpi и сохранены в формате tiff.

Формулы

Математические формулы набираются в WinWord встроенным редактором формул, в качестве которого в последних версиях WinWord используется упрощенный вариант редактора формул MathType. В случае недостаточности упрощенного варианта необходимо инсталлировать полную коммерческую версию MathType. Уравнения располагаются по центру строки и нумеруются арабскими цифрами в круглых скобках в порядке их упоминания в тексте. Номера уравнений выравниваются по правому краю строки. Уравнения отделяются от текста сверху и снизу одной пустой строкой. При написании нескольких уравнений они также разделяются пустой строкой.

В НОМЕРЕ

Математические модели кривой намагничивания и петель магнитного гистерезиса. Часть I. Анализ моделей <i>Матюк В.Ф., Осипов А.А.</i>	3
Опыт использования индикаторов структуры высокопрочного чугуна типа ИЧ в условиях производства <i>Баев А.Р., Коновалов Г.Е., Майоров А.Л., Парадинец В.В.</i>	36
Неразрушающий контроль в промышленности. Магнитный контроль <i>Горбаш В.Г., Делендик М.Н., Павленко П.Н.</i>	48
Инженерный центр подготовки унитарного предприятия «Белгазпромдиагностика» <i>Какошко Е.Ю., Левчук В.А., Тарасевич Е.В.</i>	64
Четвёртый Республиканский конкурс специалистов НК – состоялся! <i>Филиппов К.А.</i>	68
Конференции	74
Авторский указатель	76
Правила для авторов	78