

Неразрушающий Контроль и Диагностика



Электронная версия журнала
<http://science.by/nauka/13/>

№ 4 2011

Главный редактор

Мигун Н.П.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА

Редакционная коллегия:

№ 4, 2011

Аскирко С.Д.
Боровский В.В.
Венгринович В.Л.
Войцехович Л.Н.
Высоцкий М.С.
Горбаш В.Г.
Жагора Н.А.
Зуйков И.Е.
Ивлев С.А.
Кулагин В.Н.
Лухвич А.А.
Матюк В.Ф.
Мелешко А.Л.
Пантелеенко Ф.И.
Попоудина С.А.
Рудницкий В.А.
Сергеев С.С.

*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*

Неразрушающий контроль и диагностика
(Электронная версия журнала: <http://science.by/nauka/13/>)

Научно-практический журнал

Издатели

*Государственное научное учреждение
«Институт прикладной физики НАН Беларуси»*

*Республиканское научно-производственное унитарное предприятие
«Диатех»*

Адрес редакции:
220072 г. Минск, ул. Академическая, 16, к. 314.
Тел. +375 17 284 0686,
факс +375 17 284 1740,
e-mail: diatech@tut.by
URL <http://science.by/nauka/13/>

Подписано в печать 20.12.2011.
Формат 60x84 1/8.
Бумага офсетная. Гарнитура Cambria.
Усл. печ. л. 7,44.
Тираж 100 экз.

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

Тексты публикуются в авторской версии без редакционных изменений.

ISSN 2224-1752 (печатная версия журнала).
ISSN 2224-5502 (электронная версия журнала).

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

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

УДК 620.179.14

**ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ
ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИИ**
*Measuring magnetic characteristics of soft magnetic
materials and products in quasistatic remagnetization*

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

Обоснован принцип построения и описано устройство автоматизированной установки УИМХ (установка для измерения магнитных характеристик), предназначенной для выполнения измерений на магнитомягких материалах в квазистатическом режиме перемагничивания (0,05–0,5 Гц) при определении основной кривой намагничивания, предельной и частных петель магнитного гистерезиса и их параметров. Измерения проводятся в замкнутой (на кольцевых образцах) и в разомкнутой (в соленоиде) магнитной цепи. Представлен новый метод снижения погрешности измерения и новый преобразователь для проведения измерений в разомкнутой магнитной цепи, приведены технические характеристики и предложены области возможного применения.

The construction principles are proved and automated device DMMC (device for measuring the magnetic characteristics) structure is described, it is designed to perform measuring on soft magnetic materials in the quasistatic magnetization reversal mode (0,05-0,5 Hz) and to determine the basic magnetization curve, the limit and private hysteresis loops and their parameters. Measurements are taken in the closed (on ring samples) and in the open (in the solenoid) magnetic circuits. A new method for reducing the measurement error and a new transducer for measuring in an open magnetic circuit is represented, and specifications and fields of possible application are given.

Введение

К магнитомягким материалам (МММ) относятся ферромагнитные материалы с коэрцитивной силой до 4 кА/м [1]. Они широко применяются в электротехнической промышленности, приборостроении, технике связи, энергетике и других областях производства. К МММ относятся и многие изделия черной металлургии и машиностроения,

знание магнитных характеристик которых необходимо при разработке и применении магнитных методов и приборов неразрушающего контроля.

Процесс испытания ферромагнитного материала включает подготовку образца, его намагничивание или перемагничивание, измерение величины воздействующего на образец магнитного поля и отклика образца на это воздействие и получение в результате обработки полученных данных необходимых магнитных характеристик.

Для определения магнитных характеристик материала в большинстве случаев необходимо знать магнитную индукцию B (или намагниченность M) испытуемого образца и соответствующую ей напряженность H намагничивающего поля. По этим величинам можно построить кривую намагничивания и петлю магнитного гистерезиса или вычислить магнитную проницаемость и другие магнитные характеристики. Поэтому задача определения магнитных характеристик сводится к применению тех или иных методов и средств формирования и измерения напряженности намагничивающего поля и измерения магнитной индукции испытуемого образца.

По основной кривой намагничивания могут быть определены:

- максимальная напряженность H_m намагничивающего поля;
- максимальная магнитная индукция B_m (максимальная намагниченность M_m);
- начальная μ_n и максимальная μ_m магнитные проницаемости;
- магнитная проницаемость $\mu_{0,1}$ при намагничивающем поле, равном $0,1$ А/м;
- напряженность $H_{\mu m}$ намагничивающего поля, при котором достигается μ_m ;
- магнитные индукции $B_{\mu m}$, B_{Hc} и B_{2Hc} (намагниченности $M_{\mu m}$, M_{Hc} и M_{2Hc}) при намагничивающем поле, равном соответственно $H_{\mu m}$, коэрцитивной силе H_c и двум коэрцитивным силам $2H_c$.

По предельной петле магнитного гистерезиса определяются:

- остаточная магнитная индукция B_r (остаточная намагниченность M_r);
- коэрцитивная сила H_c (H_{cB} – по индукции и H_{cM} – по намагниченности);
- релаксационная коэрцитивная сила H_r ;
- релаксационная магнитная индукция B_{Hr} (релаксационная намагниченность M_{Hr});
- остаточная магнитная индукция B_{rc} (остаточная намагниченность M_{rc}) после снятия поля, равного H_c ;

- максимальная дифференциальная μ_{dm} магнитная проницаемость;
- напряженность намагничивающего поля $H_{\mu dm}$ и магнитная индукция $B_{\mu dm}$ (намагниченность $M_{\mu dm}$), соответствующие максимуму дифференциальной магнитной проницаемости;
- потери энергии на гистерезис P_r .

По результатам измерений рассчитываются намагниченность M_s насыщения (по закону подхода к насыщению при достаточно больших H_m $M_s = 1 / \operatorname{tg}\left(\frac{\Delta(H_m/M_m)}{\Delta H_m}\right)$ [2]), релаксационная магнитная проницаемость $\mu_r = B_{Hr}/(\mu_0 H_r)$, где μ_0 – магнитная постоянная, и коэффициент $k_{\Pi} = M_r/M_s$ прямоугольности петли магнитного гистерезиса.

Основная кривая намагничивания, петля магнитного гистерезиса, кривые возврата и определяемые магнитные характеристики показаны на рисунке 1.

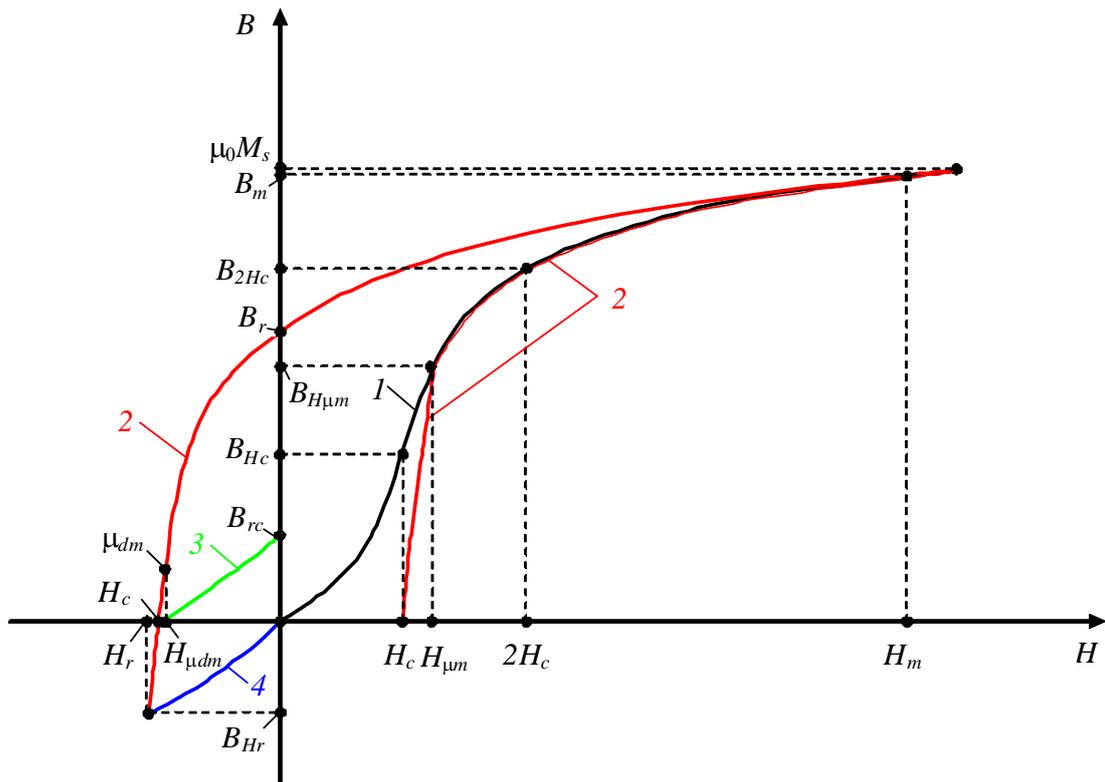


Рис. 1. Кривая намагничивания (1), часть петли магнитного гистерезиса (2), кривая возврата от коэрцитивной силы (3), кривая возврата от релаксационной коэрцитивной силы (4) и измеряемые магнитные характеристики

Качество изделий из МММ зависит от соответствия их магнитных характеристик стандартам, что предъявляет соответствующие требования к их технологическому и приемосдаточному контролю. Методику выполнения измерений при определении основной кривой намагничивания и петли магнитного гистерезиса образцов из МММ, перечень определяемых параметров (μ_n , μ_m , B_r , H_{CB} , H_{CM}), температурные коэффициенты этих параметров и требования к испытуемым образцам и измерительной аппаратуре устанавливает ГОСТ 8.377-80 [1].

Развитие методов и приборов неразрушающего контроля требует (дополнительно к определяемым по [1]) сведений о других (H_m , B_m или M_m , $H_{\mu m}$, $B_{\mu m}$, B_{Hc} и B_{2Hc} или $M_{\mu m}$, M_{Hc} и M_{2Hc} , H_r , B_{Hr} , B_r^B или M_r^B , μ_{dm} , μ_{dHc} , $B_{\mu dm}$ или $M_{\mu dm}$, M_s , μ_r и P_r) магнитных параметрах [3–6].

В связи с этим широко ведутся работы по созданию новых автоматизированных средств измерения магнитных характеристик магнитомягких материалов с использованием средств вычислительной техники [7 – 14].

В данной работе обосновывается принцип построения и дается описание установки для измерения основных магнитных характеристик магнитомягких материалов в соответствии с [1] и магнитных параметров для целей магнитной структуроскопии.

1. Принципы построения средств измерения магнитных характеристик магнитомягких материалов

1.1. Основные методы исследования магнитных свойств вещества

При исследовании магнитных характеристик веществ применяются баллистический (или импульсно-индукционный), магнитометрический, электродинамический, индукционный, вибрационный, пондеромоторный, мостовой, ваттметрический, калориметрический, резонансный и нейтронографический методы [15].

Баллистический метод до недавнего времени был одним из наиболее распространенных методов определения магнитных характеристик ферромагнитных материалов [8, 9, 16]. Он основан на измерении количества электричества, протекающего через витки катушки, охватывающей образец, при быстром изменении магнитного потока, сцепляющегося с этой катушкой (установки типа БУ-3 и У5045). Изменение магнитного потока может быть осуществлено несколькими способами: удалением катушки из поля, изменением ее положения в пределах поля и изменением направления поля. Данный метод поз-

воляет определить основную кривую магнитной индукции или намагниченности, петлю магнитного гистерезиса, различные виды проницаемости и размагничивающий фактор ферромагнитных образцов [14, 16]. Основным недостатком баллистического метода является то, что он требует значительных временных затрат и плохо поддается автоматизации.

Магнитометрический метод основан на воздействии исследуемого образца на магнитную стрелку, расположенную на некотором расстоянии от него. По углу отклонения этой стрелки от начального положения определяют магнитный момент образца, по которому вычисляют его намагниченность или магнитную индукцию а также напряженность намагничивающего поля. Примером реализации магнитометрического метода является астатический магнитометр. Магнитометрический метод позволяет определить основную кривую по намагниченности и по индукции, петлю магнитного гистерезиса и магнитную восприимчивость. Вследствие высокой чувствительности магнитометрический метод применяется для измерений геомагнитного поля и для решения ряда метрологических задач, однако он непригоден для автоматизации измерений [15].

Электродинамический метод состоит в измерении угла поворота рамки с током, находящейся в магнитном поле намагниченного образца. Данным методом можно определить основную кривую и петлю магнитного гистерезиса, причем шкала прибора может быть проградуирована непосредственно в единицах измеряемой величины (индукции или напряженности поля) [15].

Индукционный метод заключается в измерении электродвижущей силы (э.д.с.) индукции, которая возбуждается во вторичной обмотке, намотанной на исследуемый образец, намагничиваемый полем, создаваемым пропусканием переменного тока через первичную обмотку. Индукционный метод позволяет определять основную кривую по намагниченности и по индукции, петлю магнитного гистерезиса и различные виды магнитной проницаемости. Данный метод может использоваться и для измерения намагниченности в сильных импульсных магнитных полях, а также магнитной восприимчивости диа- и парамагнетиков в радиочастотном диапазоне [15].

Вибрационный метод является разновидностью индукционного. Он применяется для испытания ферромагнитных образцов малых размеров. При данном методе находящийся в однородном магнитном поле испытуемый образец или измерительную катушку подвергают вибрационным колебаниям. В результате этих колебаний в последней

возникает электродвижущая сила индукции, пропорциональная магнитной индукции образца [17 – 19]. Метод обладает хорошей чувствительностью и удовлетворительной точностью, но требует высокой однородности и стабильности намагничивающего поля, стабильности амплитуды и частоты вибрационных колебаний, постоянства размеров испытуемых образцов и их расположения относительно измерительной катушки, характеризуется малой производительностью и требует длительного процесса градуировки измерительной цепи по образцам с известными магнитными свойствами [9, 15].

Пондеромоторный метод основан на измерении механической силы, действующей на исследуемый образец в магнитном поле. Он позволяет измерять намагниченность и магнитную восприимчивость. Наиболее широко применяется при определении магнитных свойств слабомагнитных веществ (в маятниковых, крутильных и рычажных магнитных весах).

Мостовой метод заключается в измерении на переменном токе индуктивности и активного сопротивления катушки с сердечником, в качестве которого используется исследуемый ферромагнитный образец, путем уравнивания измерительного моста с помощью переменных активного сопротивления и индуктивности или активного сопротивления и емкости. Этот метод позволяет определить зависимость магнитной индукции и намагниченности от величины намагничивающего поля, начальную, среднюю и комплексную магнитные проницаемости, комплексное магнитное сопротивление, коэффициент потерь и полных потерь. Недостатком метода является зависимость результатов измерений от взаимного влияния индуктивных и емкостных элементов моста друг на друга, индуктивности неиндуктивных элементов и наличие паразитных проводимостей. Погрешность измерений может быть доведена до 3–5 % [15, 16].

Потенциометрический метод основывается на измерении намагничивающего тока в первичной обмотке испытуемого образца и электродвижущей силы, индуцируемой в его вторичной обмотке, по напряжению на образцовом резисторе с помощью потенциометра переменного тока. Данным методом определяют зависимость магнитной индукции и намагниченности от величины намагничивающего поля, начальную, среднюю и комплексную магнитные проницаемости, комплексное магнитное сопротивление, коэффициент потерь и полных потерь. Недостатком метода является то, что магнитные характеристики определяются по первым гармоникам магнитной индукции и напряженности магнитного поля. Погрешности их определения при

синусоидальной форме измеряемых сигналов обычно составляют около 3 %. При появлении высших гармоник в измеряемых сигналах погрешность определения магнитных характеристик существенно возрастает [15, 16].

Ваттметрический метод является наиболее распространенным методом для измерения потерь на гистерезис при синусоидальном изменении во времени магнитной индукции. Он состоит в определении ваттметром мощности, поглощаемой в цепи катушки, используемой для перемагничивания испытуемого образца. Метод стандартизован для испытания электротехнических сталей [16].

Калориметрический метод является абсолютным методом измерения потерь в ферромагнитных материалах в широком частотном диапазоне при любых законах изменения напряженности магнитного поля и магнитной индукции. В данном методе мерой потерь на перемагничивание является температура испытуемого образца, определяемая с помощью калориметров [20].

Резонансный метод основан на сравнении индуктивности с исследуемым образцом и известной индуктивности посредством настройки измерительной схемы в резонанс или на определении индуктивности с образцом с помощью измерителя добротности (куметра) [16].

Нейтроннографический метод применяется для исследования магнитной структуры ферромагнитных и антиферромагнитных веществ. Он основан на явлении магнитного рассеяния нейтронов в результате взаимодействия магнитного момента нейтронов с магнитными моментами частиц вещества [15].

1.2. Измерения в режиме медленно изменяющегося внешнего магнитного поля

Наиболее просто осуществляется автоматизация процесса намагничивания исследуемого образца и измерение всех его магнитных характеристик при использовании метода медленно изменяющегося магнитного поля [21]. На этом методе основано большинство магнитоизмерительных установок для научных исследований и для контроля качества. Измерение магнитных характеристик по методу медленно изменяющегося внешнего поля может осуществляться в режиме

– линейного изменения напряженности внешнего магнитного поля;

– поддержания постоянной скорости изменения магнитной индукции $\partial B/\partial t = \text{const}$;

– поддержания заданной ошибки воспроизведения по индукции статического цикла гистерезиса $\delta_B(t) = B_{\text{ст}}(t) - B(t) = \text{const}$.

Для того, чтобы результаты измерения при линейном изменении напряженности внешнего магнитного поля были близки к статическим, необходимо относительно большое время перемагничивания, что приводит к необходимости увеличения постоянной индукционно-го преобразователя.

Достоинствами второго режима намагничивания являются его близость к статическому и снижение требований к динамическому диапазону усилительных и интегрирующих устройств. Однако для правильного выбора скорости изменения магнитной индукции необходимо иметь определенную априорную информацию об исследуемом образце (удельную электрическую проводимость материала, коэрцитивную силу и тип петли гистерезиса материала) [9].

Режим перемагничивания, обеспечивающий $\delta_B(t) = \text{const}$, позволяет значительно снизить время перемагничивания и повысить чувствительность по индукции и полю. Однако алгоритм управления, который обеспечивал бы заданный режим перемагничивания, требует довольно сложной технической реализации.

Неплохую точность измерения можно получить при использовании для намагничивания изделия генератора тока ступенчатой формы с интегрированием сигнала измерительной обмотки в течение времени изменения магнитного потока, последующим численным интегрированием полученных массивов и коррекцией дрейфа измерительного тракта [7, 8]. Этот метод обеспечивает высокую точность и стабильность измеренных характеристик (1% дрейфа от предела измерения за минуту на трех диапазонах: 0,1; 1 и 10 мВб). Получение столь высоких характеристик позволило реализовать на основе этого метода измерительную установку 2-го разряда [22, 23]. Однако данный метод не позволяет использовать его при различных формах перемагничивающего поля в широком диапазоне частот и обладает погрешностью порядка младшего разряда аналого-цифрового преобразователя на одну измеренную точку. Поэтому максимальная точность может быть получена либо в строго определенных точках, либо при минимальном их числе (увеличение количества точек приводит к возрастанию погрешности проинтегрированного численными методами массива).

В связи с этим при построении установки для измерения магнитных характеристик магнитомягких материалов (установка УИМХ) нами был выбран принцип медленно изменяющегося магнитного поля в режиме линейного изменения напряженности внешнего поля.

2. Выбор режимов перемагничивания и измерения

2.1. Перемагничивание в замкнутой магнитной цепи

Измерение магнитных характеристик материалов необходимо проводить в замкнутой магнитной цепи [1]. Для этой цели применяются специальные намагничивающие устройства (пермеаметры) или измерения проводят на образцах кольцевой формы [20]. Вследствие отсутствия влияния размагничивающего фактора при перемагничивании в замкнутой магнитной цепи для технического насыщения испытуемых образцов требуются меньшие величины намагничивающих полей. В установке УИМХ для измерения магнитных свойств материалов используются кольцевые образцы.

Кольцевые образцы намагничивают полем тока, протекающим по многовитковой равномерно распределенной по окружности образца обмотке (реже по одиночному проводу, проходящему через центр образца), а э.д.с. индукции снимают с измерительной обмотки.

Технология, способы и погрешности изготовления кольцевых образцов, предназначенных для магнитных измерений в замкнутой магнитной цепи, определены в [1]. Выбор размеров образцов, числа витков измерительной и намагничивающей обмоток является важной составной частью измерения магнитных характеристик вещества [24]. Каждая установка, предназначенная для измерения магнитных характеристик, налагает те или иные ограничения на используемые образцы. Для упрощения процесса проведения измерений нами разработана методика подготовки кольцевых образцов [25].

В соответствии с [1] основными требованиями к кольцевым образцам являются постоянство сечения по окружности образца (не хуже 1 %) и его размеры.

Образцы, изготовленные механической обработкой, перед испытанием должны быть термически обработаны в соответствии с требованиями стандарта или технических условий на испытуемый материал. После термической обработки они не должны подвергаться механическим воздействиям (ударам, сжатию, изгибам, тряске).

Кольцевые образцы из листовых и ленточных материалов изготавливают в виде пакета, набранного из штампованных (при толщине листа или ленты 0,05 мм и более) или точеных колец, или навивают из ленты (при толщине ленты 0,2 мм и менее). Образцы из проволоки изготавливают навивкой на цилиндрический шаблон. Образцы из проволоки и ленты толщиной менее 0,02 мм навивают на каркасы из термостойкого неферромагнитного материала с температурным коэффициентом линейного расширения, не превышающим температурный коэффициент линейного расширения материала образца.

Результаты магнитных измерений зависят не только от свойств магнитных материалов, режимов перемагничивания и условий испытаний, но и от размеров кольцевых образцов. Поэтому важной задачей является определение оптимальных размеров испытываемых образцов в случае, когда образцы изготавливаются специально для проведения испытаний. В этом случае, а также при испытаниях образцов заданных размеров, необходимо рассчитывать параметры намагничивающей и измерительной обмоток.

При определении размеров образцов следует учитывать возможность намотки намагничивающей и измерительной обмоток. Поэтому, как правило, внутренний радиус $R_{вн}$ должен быть не менее 15 мм. Наружный радиус $R_{внш}$ кольцевого образца не должен превышать его внутренний радиус более чем в 1,3 раза, иначе погрешности определения магнитных характеристик будут превышать значения, указанные в [1].

Одним из важных элементов расчета является выбор высоты кольца h . Предпочтительнее использовать кольца с квадратным поперечным сечением, то есть, когда $h = \Delta R = R_{внш} - R_{вн}$. В случаях, если это невозможно, например, когда кольца изготавливаются из листов стали с фиксированной толщиной, ширина колец вычисляется по их поперечному сечению S : $\Delta R = S/h$. Для магнитомягких сталей по [26] рекомендуется выбирать величину S не менее 10 мм². Требуемое сечение испытываемого образца может быть обеспечено за счет использования нескольких колец одного диаметра.

На подготовленные образцы должны быть нанесены измерительная и намагничивающая обмотки. Измерительная обмотка должна быть расположена по возможности равномерно по длине окружности образца, а концы ее перевиты [1]. Для намотки используют провод диаметром 0,1÷0,15 мм. Число витков измерительной обмотки определяется из следующего соотношения:

$$W_{\text{изм}} = \frac{\Phi_{\text{min}} C_B}{B_m S}, \quad (1)$$

где Φ_{min} – минимальная величина магнитного потока, которая измеряется установкой с точностью 2%, а C_B – постоянная магнитоизмерительной установки (для УИМХ $\Phi_{\text{min}} = 2 \cdot 10^{-5}$ Вб $C_B = 204$). Если величина максимальной индукции B_m для испытуемого материала не известна, то для низкоуглеродистых и среднеуглеродистых сталей рекомендуется принимать ее равной 1,2 Тл.

Намагничивающая обмотка должна быть расположена равномерно по длине окружности образца поверх измерительной обмотки. Обычно рекомендуют намагничивающую обмотку выполнять медным изолированным проводом диаметром 0,5÷0,8 мм. Число витков намагничивающей обмотки $W_{\text{нам}}$ вычисляется по формуле

$$W_{\text{нам}} = \frac{\pi H_m (R_{\text{вн}} + R_{\text{вш}})}{I_m}. \quad (2)$$

Максимальная напряженность H_m магнитного поля должна превышать значение коэрцитивной силы образца H_c в 5÷10 раз. Максимальное значение тока для установки УИМХ $I_m = 5$ А. При определении числа витков следует учитывать возможность заполнения внутреннего диаметра кольца, диаметры проводов измерительной и намагничивающей обмоток с учетом изоляции, а также предельно допустимое активное сопротивление намагничивающей обмотки [25].

2.2. Перемагничивание в разомкнутой магнитной цепи

В соответствии с [1] в разомкнутой магнитной цепи может измеряться только коэрцитивная сила. Другие магнитные характеристики, измеренные в разомкнутой магнитной цепи, являются характеристиками тела и могут служить только в качестве параметров для неразрушающего контроля. Испытуемые образцы могут иметь форму полос, прутков, прямоугольных параллелепипедов и цилиндров, сечение которых не должно отличаться по длине более, чем на 5 %. Отношение длины образца к его диаметру (или корню квадратному из площади поперечного сечения) должно быть не менее 10.

В качестве источника магнитного поля при испытаниях в разомкнутой магнитной цепи применяют соленоиды. Максимальная

напряженность магнитного поля $H_{\text{тсол}}$, создаваемого в центре соленоида, должна быть достаточной для намагничивания испытуемого образца до технического насыщения

$$H_{\text{тсол}} \geq H_m + N(B_m / \mu_0 - H_m), \quad (3)$$

где $H_{\text{тсол}}$ – значение напряженности поля, необходимое для намагничивания материала образца до технического насыщения, N – коэффициент размагничивания.

Для образцов с сечением, близким к квадратному, [1]

$$N = 0,42d/l, \quad (4)$$

где d – диаметр или сторона квадрата, l – длина образца.

Для магнитомягких материалов H_m составляет примерно 30 кА/м, а B_m не превышает 2,5 Тл. На рисунке 2 представлена зависимость напряженности магнитного поля $H_{\text{тсол}}$ в центре соленоида, обеспечивающая техническое насыщение испытуемого образца, от соотношения его длины к диаметру (или стороне квадрата). Из него видно, что величина намагничивающего поля 40 кА/м обеспечивает техническое насыщение магнитомягких образцов при соотношении $l/d \geq 80$ (при $H_m = 30$ кА/м и $B_m = 2,5$ Тл).

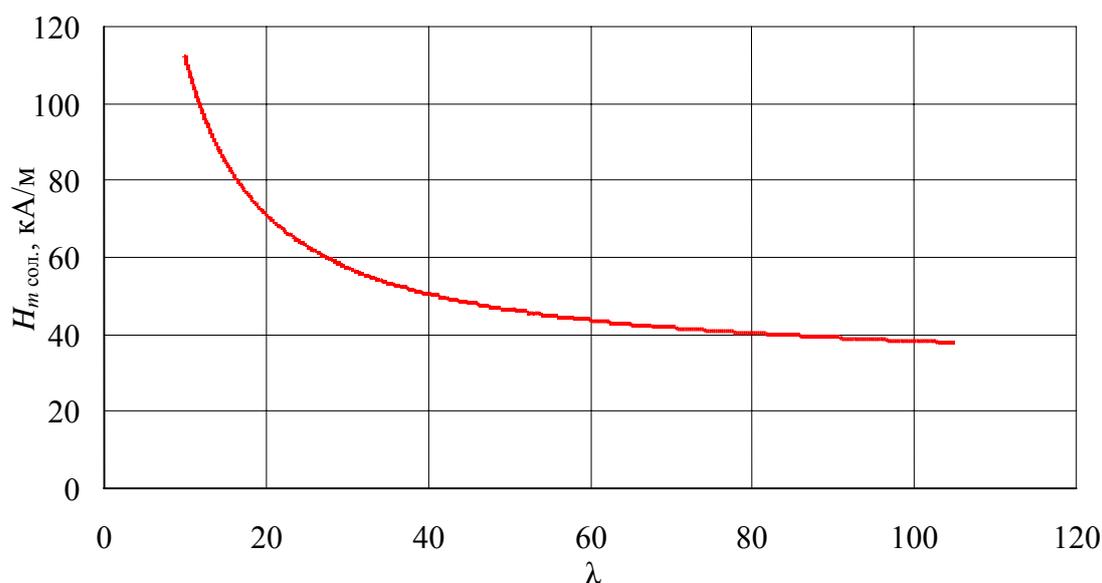
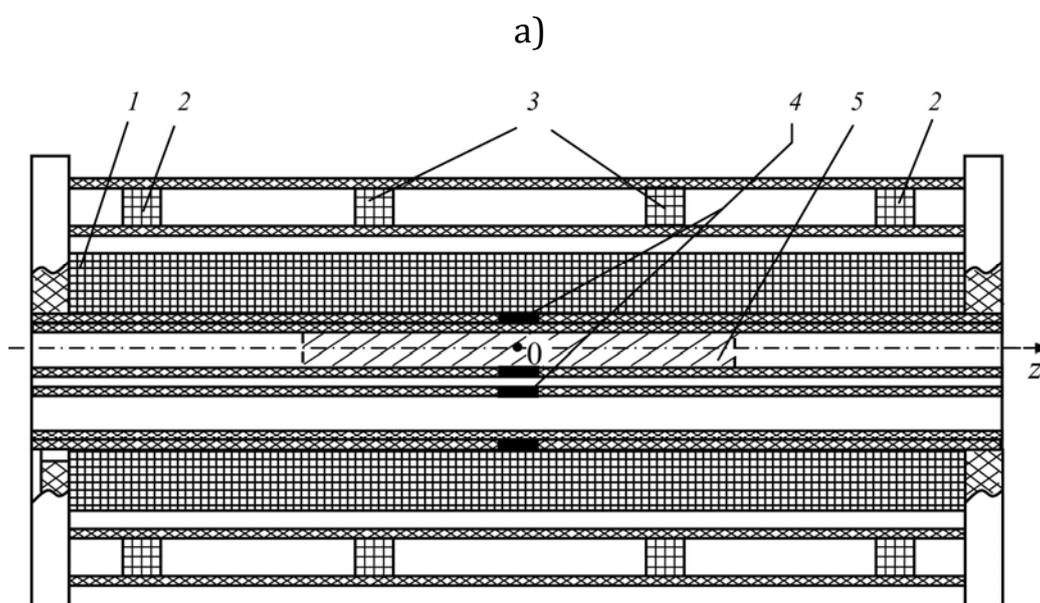


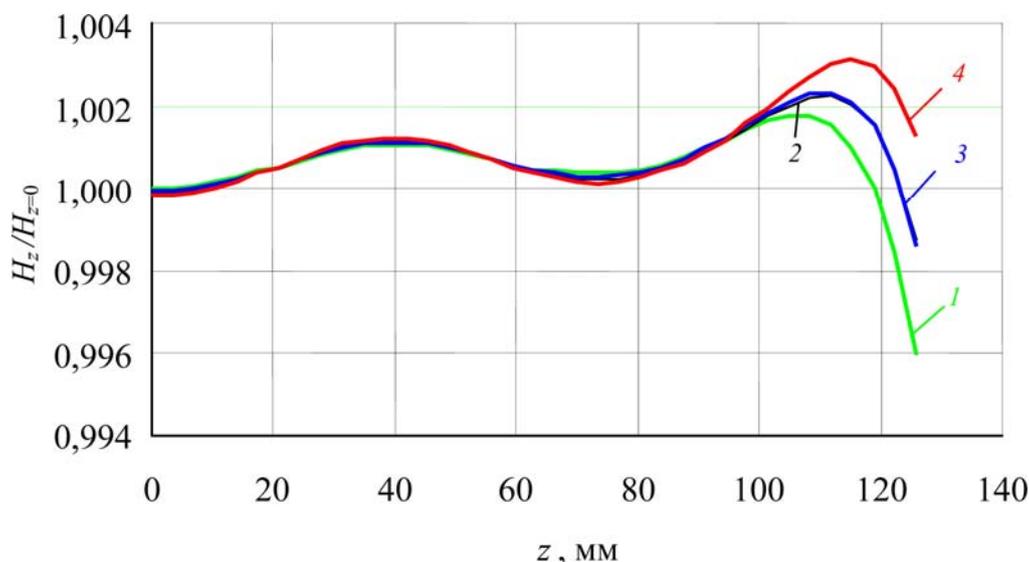
Рис. 2. Влияние относительной длины $\lambda = l/d$ образца на напряженность $H_{\text{тсол}}$ поля, при котором достигается техническое насыщение материала

Согласно требованиям ГОСТ 15058-69 [27] и ГОСТ 8.377-80 [1] неоднородность магнитного поля вдоль оси соленоида не должна превышать 1% на расстоянии от центра, равном половине длины образца. Известны устройства, удовлетворяющие этим требованиям [1]. Однако использование их в разрабатываемой установке нецелесообразно из-за больших габаритов, веса и потребляемой мощности. Нами была поставлена задача обеспечения требуемой однородности магнитного поля при существенно меньших размерах соленоида [28].

Для этого многовитковый соленоид был дополнен двумя парами одинаковых компенсирующих обмоток. Обмотки первой пары расположены поверх соленоида вблизи его торцов и соединены с ним последовательно-согласно. Обмотками второй пары расположены поверх соленоида симметрично относительно его центра и соединены с ним и с первыми двумя последовательно-согласно либо последовательно-встречно. Длина компенсирующих обмоток значительно меньше длины соленоида, и они выполнены с возможностью перемещения вдоль оси преобразователя при его настройке (рисунок 3, а) [28]. Для компенсации в процессе измерения магнитной индукции образца магнитного потока, создаваемого соленоидом, и для сравнения магнитной индукции испытуемого и эталонного образцов, преобразователь имеет две рабочие зоны. Центральную часть каждой из рабочих зон охватывает соответствующая измерительная катушка. Измерительные катушки соединены последовательно-встречно.



б)



а: 1 – соленоид; 2, 3 – компенсирующие обмотки; 4 – измерительные обмотки; 5 – рабочая зона
 б: 1 – $x = 0, y = 0$; 2 – $x = 5 \text{ мм}, y = 0$; 3 – $x = 0, y = 10 \text{ мм}$; 4 – $x = 5 \text{ мм}, y = 10 \text{ мм}$

Рис. 3. Преобразователь установки УИМХ (а) и относительное изменение напряженности магнитного поля $H_z/H_{z=0}$ вдоль оси преобразователя при поперечном смещении точки измерения от оси рабочей области (б)

Величина намагничивающего поля определяется величиной тока через намагничивающую обмотку колец. Магнитное поле, создаваемое системой из n коаксиальных круговых катушек произвольного сечения, можно представить в виде [29]

$$H(z) = \sum_{i=0}^{n-1} H_{zi}(z), \quad (5)$$

где $H_{zi}(z)$ – напряженность поля i -ой катушки в точке наблюдения z .
 Величину $H_{zi}(z)$ определяли по выражению [29]

$$H_{zi} = \frac{1}{2} J_i \left\{ \left(\frac{L_i}{2} - z \right) \ln \frac{R_{Hi} + \sqrt{R_{Hi}^2 + \left(\frac{L_i}{2} - z \right)^2}}{R_{Bi} + \sqrt{R_{Bi}^2 + \left(\frac{L_i}{2} - z \right)^2}} + \left(\frac{L_i}{2} + z \right) \ln \frac{R_{Hi} + \sqrt{R_{Hi}^2 + \left(\frac{L_i}{2} + z \right)^2}}{R_{Bi} + \sqrt{R_{Bi}^2 + \left(\frac{L_i}{2} + z \right)^2}} \right\}, \quad (6)$$

где J_i – плотность тока (A/m^2), L_i – длина (м), R_{ni} , R_{vi} – наружный и внутренний радиусы (м) i -ой катушки, причем

$$J_i = \frac{I_i \cdot w_i}{L_i \cdot (R_{ni} - R_{vi})}, \quad (7)$$

где I_i – ток (в А), а w_i – число витков i -ой катушки.

За основу расчета был взят соленоид длиной 350 мм, имеющий внешний радиус 44 мм. У данного соленоида отклонение магнитного поля от однородности менее 1% наблюдается на расстояниях до 70 мм от его центра. Это позволяет испытывать в нем образцы длиной не более 140 мм.

На рисунке 3 б в относительных единицах представлено распределение магнитного поля вдоль оси рабочей области соленоида и при смещении от нее в поперечном направлении (x и y) при наличии компенсирующих обмоток. Из представленных результатов видно, что отклонение аксиальной компоненты H_z поля преобразователя в рабочей зоне (± 100 мм) не превышает 0,2 % от ее величины в центре, что удовлетворяет требованиям ГОСТ 8.377-80 [1] для измерений в открытой магнитной цепи.

2.3. Выбор частоты перемагничивания

Особенностью намагничивания и перемагничивания магнитных материалов в периодически изменяющихся магнитных полях является влияние вихревых токов, ослабляющих проникновение магнитного поля внутрь материала и приводящих к существенной неоднородности намагничивания, а также отставание намагниченности в данный момент времени от равновесного состояния (магнитная вязкость) [30]. При толщине металла более 0,2 мм магнитную вязкость не учитывают [31]. Допустимую частоту $f_{гр}$ магнитного поля для перемагничивания образца толщиной δ_t можно определить по выражению [9]

$$f_{гр} = \frac{\rho}{\delta_t^2 \pi \mu_0 \mu_m}, \quad (8)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление.

На рисунке 4 представлены зависимости допустимой частоты $f_{гр}$ перемагничивающего поля от толщины испытываемого образца для не-

которых сплавов, величины ρ и μ_m которых взяты из [3, 5, 32]. Из рисунка видно, что при $f_{гр} \geq 0,05$ Гц даже при большой магнитной проницаемости материала допускается испытывать образцы толщиной до 5 мм.

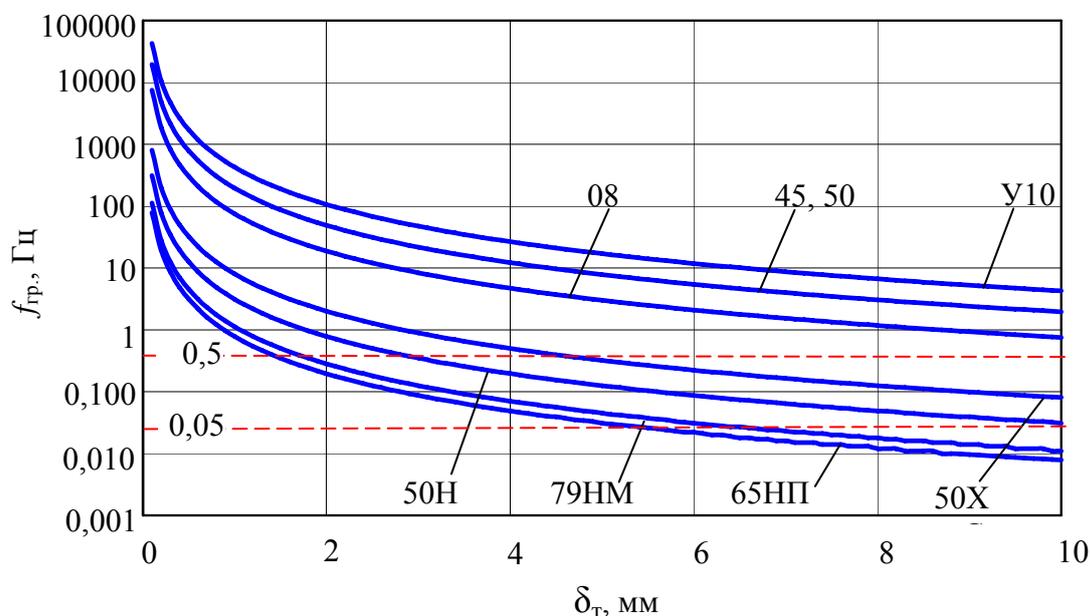


Рис. 4. Зависимость допустимой частоты $f_{гр}$ магнитного поля от толщины δ_T испытуемого образца для сплавов с разными электрическими и магнитными свойствами

2.4. Требования к системе измерения магнитной индукции

При использовании для перемагничивания медленно изменяющегося магнитного поля (частота от единиц до сотых долей герца) возникает проблема измерения малых уровней сигналов и их продолжительного интегрирования. Это налагает значительные ограничения на допустимый температурный и временной дрейф измерительного тракта, обусловленный утечками, наличием входных напряжений и токов смещения, возникновением при нагреве на контактах э.д.с. и т. д. Эти погрешности увеличиваются по мере уменьшения частоты перемагничивания [21].

Поэтому в современных разработках применяют различные схемы уменьшения этого влияния. Так в [4] смещение нулевого уровня при интегрировании компенсируют поочередным интегрированием входного сигнала и напряжения дрейфа нуля за равные промежутки времени с последующим вычитанием полученных значений. Однако точность измерений при низкочастотном (доли Гц) перемагничивании материала остается недостаточной из-за непостоянства функциональной зависимости смещения нулевого уровня при интегрировании вследствие большой длительности процесса измерения.

Для обеспечения приемлемой точности измерений магнитных характеристик ферромагнитных материалов и изделий при низкочастотном перемагничивании в установке УИМХ процесс измерения разбит на несколько этапов [33].

Основная погрешность из-за влияния смещений устраняется введением постоянного компенсирующего напряжения при настройке установки. Более точная компенсация осуществляется на основе автоматического проведения измерения в отсутствие образца и введении измеренного сигнала в аналого-цифровой преобразователь канала индукции (АЦП V). Компенсация оставшейся погрешности проводится в четыре этапа по результатам измерения до и после перемагничивания исследуемого образца (рисунок 5).

На первом этапе окончательной компенсации интегрируется э.д.с. индукции измерительной катушки до включения магнитного поля и запоминается функциональная зависимость от времени проинтегрированного сигнала $V_1(t)$. Затем испытуемый образец перемагничивается низкочастотным магнитным полем заданной амплитуды и частоты, измеряется и запоминается функциональная зависимость напряженности $H(t)$ этого поля от времени, интегрируется э.д.с. индукции измерительной катушки и запоминается функциональная зависимость от времени проинтегрированного сигнала $V_2(t)$. На третьем этапе интегрируется э.д.с. индукции измерительной катушки после выключения магнитного поля и запоминается функциональная зависимость от времени проинтегрированного сигнала $V_3(t)$. Время интегрирования до включения и после выключения магнитного поля соизмеримо со временем воздействия магнитного поля на испытуемый образец.

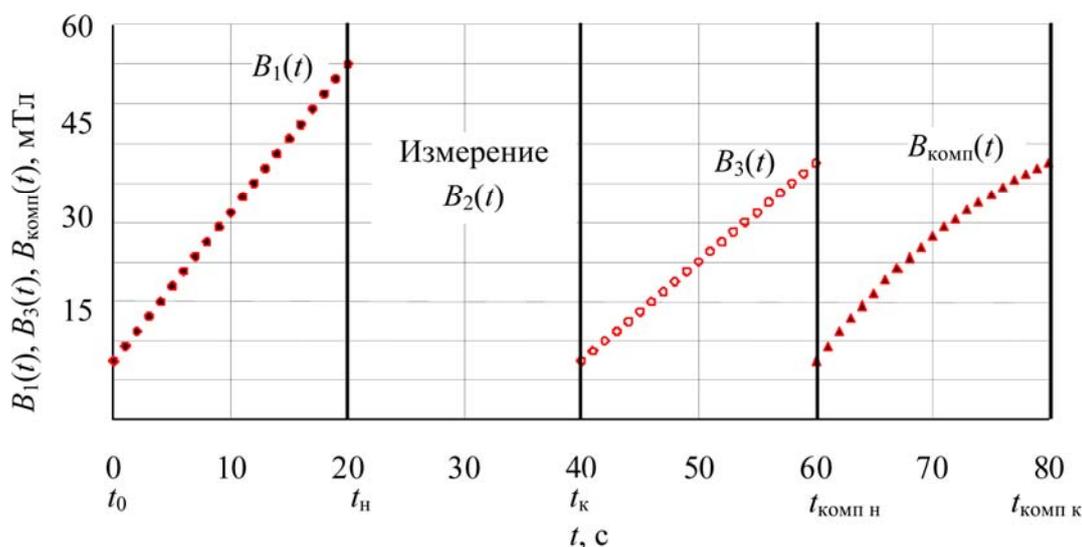


Рис. 5. Функциональные зависимости от времени дрейфа проинтегрированного сигнала $B_1(t)$ до включения магнитного поля, $B_3(t)$ – после его выключения и компенсирующего сигнала $B_{\text{комп}}(t)$

Величина магнитной индукции исследуемого образца $B(t)$ определяется на четвертом этапе с учетом весовой функции $\omega(t)$ вклада в погрешность измерений сигналов $B_1(t)$ и $B_3(t)$ по соотношению

$$B(t) = B_2(t) - B_1(t)[1 - \omega(t)] - B_3(t)\omega(t) \quad (9)$$

и индицируется синхронно с изменением хранящейся в памяти величины напряженности $H(t)$ магнитного поля для получения значений магнитной индукции при соответствующей ей величине напряженности магнитного поля и для построения кривых намагничивания и петель магнитного гистерезиса [33].

При линейном изменении каждого из выражений $B_1(t)$ и $B_3(t)$ весовая функция $\omega(t)$ может быть представлена в виде

$$\omega(t) = (t - t_n)/(t_k - t_n), \quad (10)$$

где t_n и t_k – соответственно время включения и выключения магнитного поля, t – текущий момент времени между t_n и t_k .

При таком определении весовой функции значимость ошибки $B_1(t)$ уменьшается от единицы при $t = t_n$ до нуля при $t = t_k$, а значимость ошибки $B_3(t)$ увеличивается в этом же диапазоне от нуля до единицы. Из рисунка 5 видно, что в интервале изменения времени t от $t_{\text{комп н}}$ до $t_{\text{комп к}}$ компенсирующая дрейф функция $B_{\text{комп}}(t)$ изменяется от

функции ошибки $B_1(t_n)$ до функции ошибки $B_3(t_k)$, что обеспечивает уменьшение погрешности в течение всего процесса измерения в присутствии образца в перемещающемся поле.

Оценка дрейфа измерительного канала установки при частоте перемещения 0,05 Гц (продолжительность основного этапа измерения превышала 60 с) показала, что для образцов стали 08кп сечением 7 мм² дрейф за 60 с не превысил 0,4 %, что не хуже чем у эталонной установки для измерения магнитного потока [22].

3. Структурная схема установки УИМХ

Из проведенных выше оценок вытекают **требования к основным параметрам установки**: частота перемещения должна быть от 0,5 до 0,05 Гц, пределы изменения напряженности перемещающегося поля ± 40 кА/м, пределы измерения магнитной индукции $\pm 2,5$ Тл. Из экономических и эргономических соображений длину испытываемых образцов при измерении в разомкнутой магнитной цепи ограничили величиной 200 мм.

Установка УИМХ представляет собой измерительный прибор, работа которого осуществляется под управлением персонального компьютера, регистрирующего, обрабатывающего и выводящего на экран монитора и на принтер измеренные магнитные параметры. Она состоит из преобразователя, блока намагничивания, блока управления, персонального компьютера (ПК) и принтера. Структурная схема установки представлена на рисунке 6.

3.1 Преобразователь

В соответствии с результатами приведенного выше расчета преобразователь установки УИМХ имеет следующие параметры: длина соленоида 350 мм, его внутреннее сечение – 48×36 мм², внешнее сечение – 95×85 мм², число витков $w = 2600$; длина каждой из компенсирующих обмоток первой пары 20 мм, внутренний диаметр – 107 мм, толщина намотки 15,5 мм, число витков $w = 105$; длина каждой из компенсирующих обмоток второй пары 7 мм, внутренний диаметр – 107 мм, толщина намотки 2 мм, число витков $w = 4$. Для намотки соленоида и компенсирующих обмоток использовался провод диаметром 1,5 мм. Коэффициент преобразователя по полю – 7420 1/м; его индуктивность составляет 84 мГн, а активное сопротивление – 7 Ом.

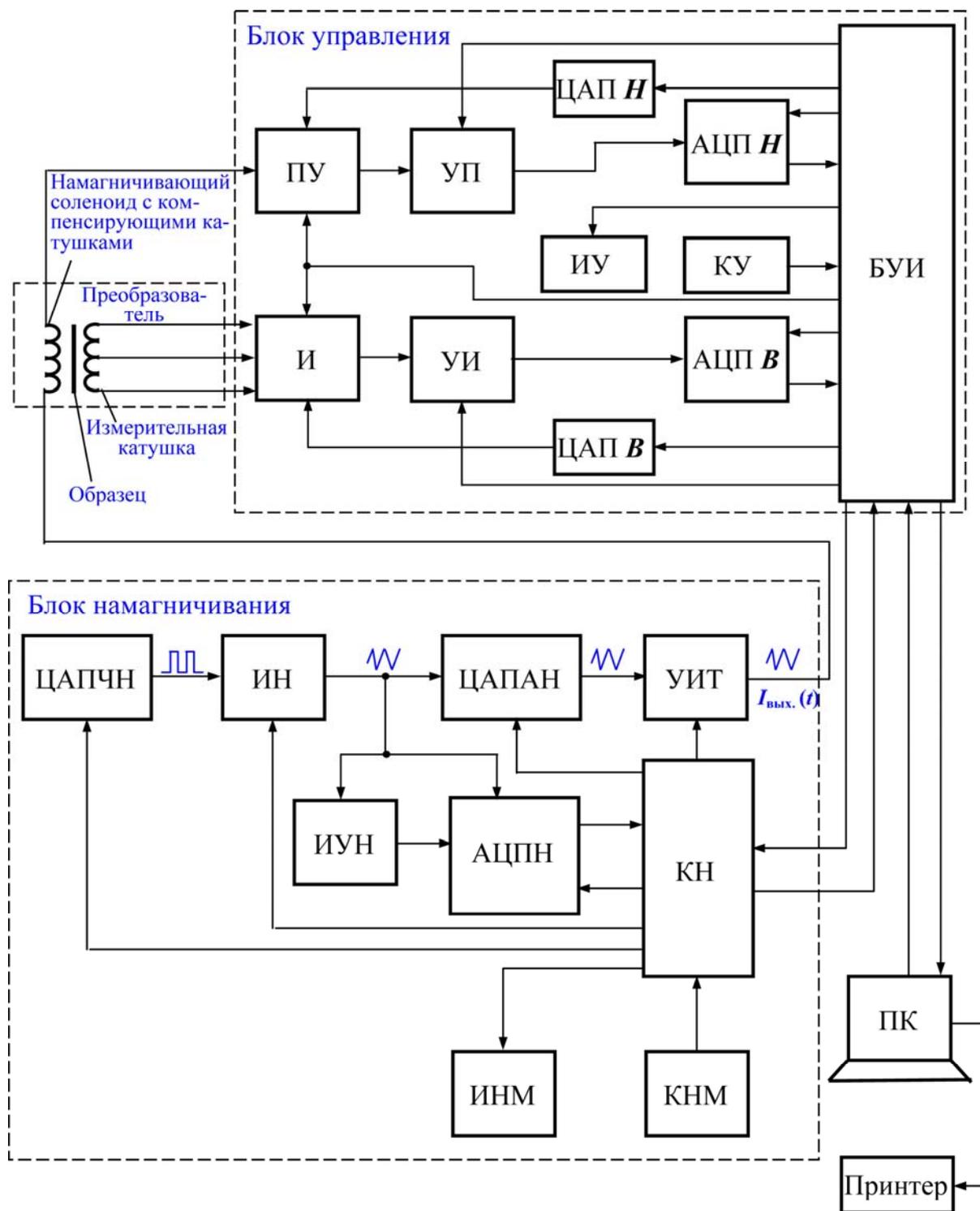


Рис. 6. Структурная схема установки УИМХ

Программное обеспечение установки включает в себя программное обеспечение микроконтроллеров блока намагничивания и блока управления, а также основной программы ПК, обеспечивающей

процессы намагничивания, измерения, обработки, сохранения и вывода измеренных параметров.

Конструкция преобразователя обеспечивает перемещение компенсирующих обмоток, что позволяет устранять некоторые нарушения однородности магнитного поля, возникающие вследствие дефектов изготовления обмоток, а также, в зависимости от постановки задачи, создавать в системе как небольшие участки распределения магнитного поля с очень высокой однородностью, так и протяженные участки магнитного поля с минимальной требуемой однородностью.

Для того, чтобы компенсировать магнитный поток поля соленоида при измерении магнитной индукции образца и для проведения сравнения испытуемого образца с эталонным, преобразователь имеет две рабочие зоны, центральную часть каждой из которых охватывает соответствующая измерительная катушка. Измерительные катушки соединены последовательно-встречно и имеют длину по 10 мм. При общей длине преобразователя 384 мм каждая из рабочих зон имеет длину 200 мм, ширину 20 мм и высоту 10 мм.

3.2. Блок намагничивания

Требования к блоку намагничивания вытекают из параметров преобразователя. Для обеспечения перемагничивающего поля в 40 кА/м при частоте 0,5 Гц источник должен обеспечивать через преобразователь максимальный ток 5,4 А при выходном напряжении 36,9 В. При частоте 0,05 Гц выходное напряжение должно иметь величину 36,6 В.

В установке используется режим линейного изменения напряженности внешнего магнитного поля, который обеспечивается линейным изменением тока в преобразователе. При этом, в отличие от непрерывно-ступенчатого перемагничивания образца [12], погрешность измерения не зависит от числа измеряемых точек [11, 34]. Для реализации этого режима используется управляемый источник тока (УИТ) фирмы *Apex Microtechnology*. Он обеспечивает необходимый уровень напряжения и тока. Особенностью данного УИТ является то, что он имеет общую землю с двухполярным источником питания.

Процессом формирования тока перемагничивания (рисунок 6) управляет контроллер блока намагничивания (КН), который получает необходимые для этого данные о требуемых амплитуде H_m и частоте f перемагничивания от ПК через блок управления измерением (БУИ). Кроме того, эти данные могут быть установлены пользователем непо-

средственно в блоке намагничивания с помощью клавиатуры блока намагничивания (КНМ) и индикатора блока намагничивания (ИНМ). Структурная схема алгоритма работы КН представлена на рисунке 7.

КН анализирует текущий двоичный код с выхода АЦПН, то есть отслеживает текущую величину напряжения на выходе интегратора намагничивания (ИН). Если значение этого напряжения превышает по абсолютной величине установленный порог, то КН заносит в ЦАПЧН другой двоичный код, который приводит к изменению направления нарастания напряжения на выходе ИН. Далее работа схемы повторяется, что обеспечивает формирование тока перемагничивания требуемой частоты как положительной, так и отрицательной полярности.

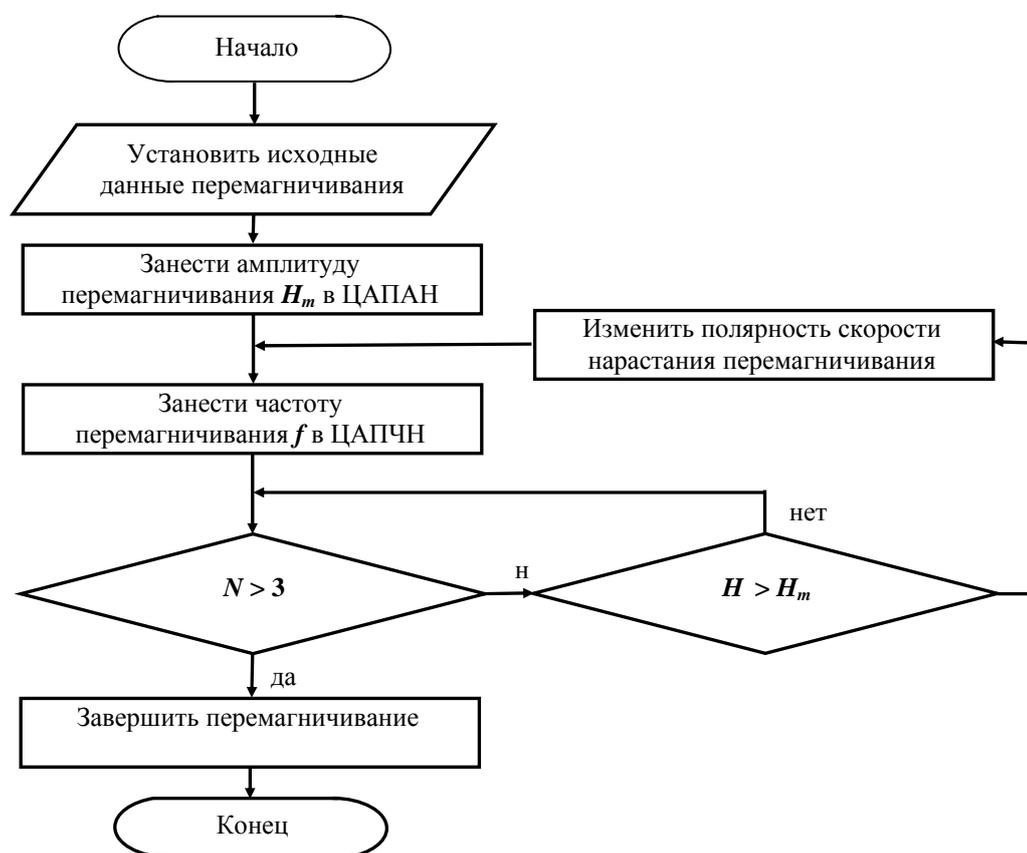


Рис. 7. Структурная схем алгоритма работы контроллера блока намагничивания (КН)

Непостоянство скорости нарастания намагничивающего тока определяется величиной входного смещения и входного тока ИН, а

также разрядностью ЦАПЧН. В интервале измерения температуры от -40°C до $+125^{\circ}\text{C}$ входное смещение ИН (микросхема AD8674) не превышает 125 мкВ (дрейф не более $0,8 \text{ мкВ}/^{\circ}\text{C}$), а входной ток – 40 нА. Разрядность ЦАПЧН равна шестнадцати (используется микросхема DAC714), причем ошибка коэффициента преобразования не превышает $\pm 0,25\%$. Так как напряжение на выходе ЦАПЧН находится на уровне единиц и десятых долей вольта, то непостоянство скорости нарастания не превышает долей процента.

Напряжение с выхода ИН поступает также на опорный вход перемножающего цифро-аналогового преобразователя амплитуды блока намагничивания (ЦАПАН), на второй (цифровой) вход которого поступает цифровой код амплитуды H_m перемагничивания с выхода КН. Такое схемное решение позволяет обеспечить независимое изменение амплитуды и частоты перемагничивающего поля.

С выхода ЦАПАН напряжение $U(t)$ треугольной формы поступает на вход управляемого источника тока (УИТ), где преобразуется в токковый сигнал $I_{\text{вых}}(t)$ той же формы, который подается в намагничивающую обмотку преобразователя.

Для повышения точности измерений за счет усреднения результатов измерения количество периодов перемагничивания выбрано равным трем. По завершению перемагничивания конденсатор ИН замыкается, и схема блока переходит в режим ожидания следующего цикла перемагничивания.

Режим размагничивания позволяет подготовить исследуемые образцы к процессу измерения. Он осуществляется аналогично режиму намагничивания. Отличие заключается лишь в том, что амплитуда каждого последующего полупериода тока размагничивания меньше предыдущего. [34].

3.3. Блок управления

Блок управления (рисунок 6) предназначен для получения исходных данных от ПК об амплитуде и частоте перемагничивающего поля и передачи их величин блоку намагничивания, о диапазоне и режиме (намагничивание, размагничивание, измерение), а также для измерения магнитной индукции испытуемого образца синхронно с изменением перемагничивающего поля, передачи измеренных параметров в ПК и для их регистрации. Выбранный диапазон измерения и тест для проверки работоспособности аналого-цифровых преобразователей блока управления могут также вводиться с клавиатуры КУ

блока управления и регистрироваться индикатором ИУ этого блока. Связь с ПК осуществляется через универсальную последовательную шину *USB*.

Для обеспечения приемлемой точности измерений магнитных характеристик ферромагнитных материалов и изделий при низкочастотном перемагничивании процесс измерения на установке УИМХ разбит на четыре этапа. Основная часть погрешности из-за влияния смещений устраняется введением постоянного компенсирующего напряжения при настройке установки. Более точная компенсация осуществляется на основе автоматического проведения измерения при отсутствии образца и введении измеренного сигнала в аналого-цифровой преобразователь канала индукции (АЦП *B*). Компенсация оставшейся погрешности производится в четыре этапа по результатам измерения до и после перемагничивания исследуемого образца (рисунок 5).

Перед началом измерения БУИ устанавливает в исходное состояние интегратор (И) блока управления, преобразователь уровня (ПУ), цифро-аналоговый преобразователь канала поля (ЦАП *H*) и цифро-аналоговый преобразователь канала индукции (ЦАП *B*). В процессе измерения БУИ управляет работой усилителя канала поля (УП), аналого-цифровым преобразователем канала поля (АЦП *H*), усилителем канала индукции (УИ) и аналого-цифровым преобразователем канала индукции (АЦП *B*). Сигналы, пропорциональные *H* и *B*, поступают в БУИ, где проводится их предварительная обработка – усреднение данных по трем циклам и формирование массивов данных, которые передаются в ПК.

ПК осуществляет пересчет измеренных величин в магнитные (поле и индукцию), рассчитывает основные магнитные характеристики испытуемого образца, сохраняет и выводит результаты перемагничивания.

3.4. Программное обеспечение установки УИМХ и порядок работы на ней

Для обработки результатов измерений и управления установкой разработана программа «Установка УИМХ», которая работает под управлением операционной системы при загруженных драйверах *D2XX* фирмы *Future Technology Devices International Ltd*.

Программа позволяет установить необходимую для испытуемого образца величину напряженности и частоты перемагничивающего

поля, ввести тип и размеры испытуемого образца, используемые при расчете магнитных параметров, вывести на экран монитора кривую намагничивания, петлю магнитного гистерезиса, максимальную величину напряженности магнитного поля и измеренные магнитные параметры испытуемого образца. Программа обеспечивает также проведение поверки установки на соответствие техническим характеристикам.

На рисунке 8 приводится главное окно программы «Установка УИМХ». В процессе измерения пользователь может ввести сведения об исследуемом образце: материал, маркировка, свойства, твердость, температура закалки и температура отпуска. Нажав на кнопку «Образец», в новом окне пользователь выбирает форму образца. Для образца прямоугольного сечения необходимо задать длину, ширину и толщину. Для круглого – длину и диаметр. Для кольцевого образца следует ввести внутренний и внешний диаметры, толщину, число витков намагничивающей катушки и число витков измерительной катушки.

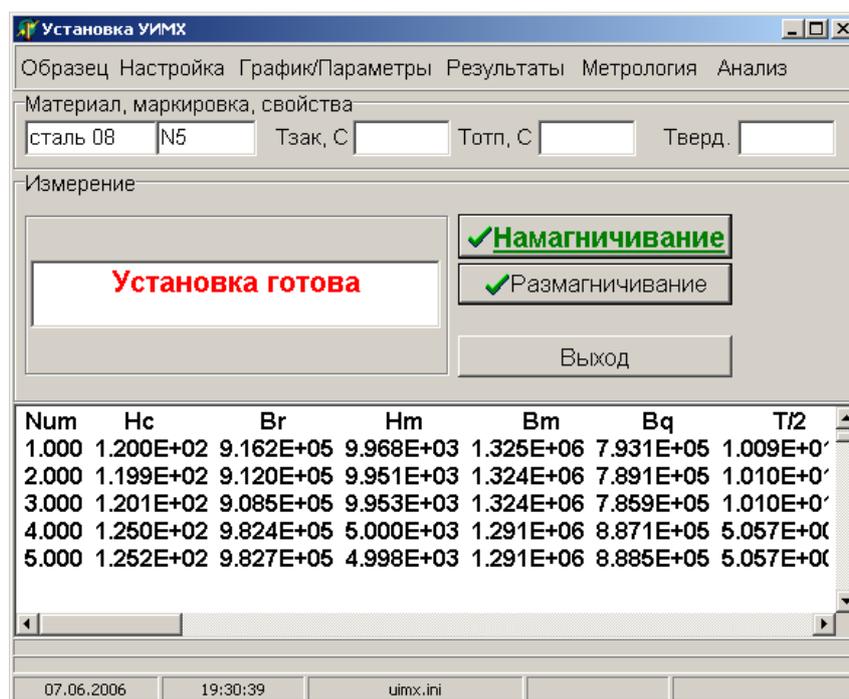


Рис. 8. Главное окно программы «Установка УИМХ»

Нажав в главном окне программы на кнопку «Настройка», в новом окне пользователь вводит необходимую величину максимального

перемагничивающего поля H_m (А/м). Аналогично он должен ввести величину частоты перемагничивающего поля F (мГц).

Для измерения необходимо нажать кнопку «Намагничивание» в основном окне программы «Установка УИМХ». После запроса программы «Введите образец в измерительную катушку» необходимо ввести образец в преобразователь. При этом в основном окне программы появляется надпись «Идет измерение». После запроса «Выведите образец из измерительной катушки» необходимо вывести образец из преобразователя. Надпись «Измерение завершено» свидетельствует об окончании измерения.

В случае необходимости можно предварительно провести размагничивание образца. Для этого необходимо нажать на кнопку «Размагничивание» в основном окне программы «Установка УИМХ» (появляется сообщение «Размагничивание») и дождаться завершения цикла размагничивания (сообщение «Конец размагничивания»).

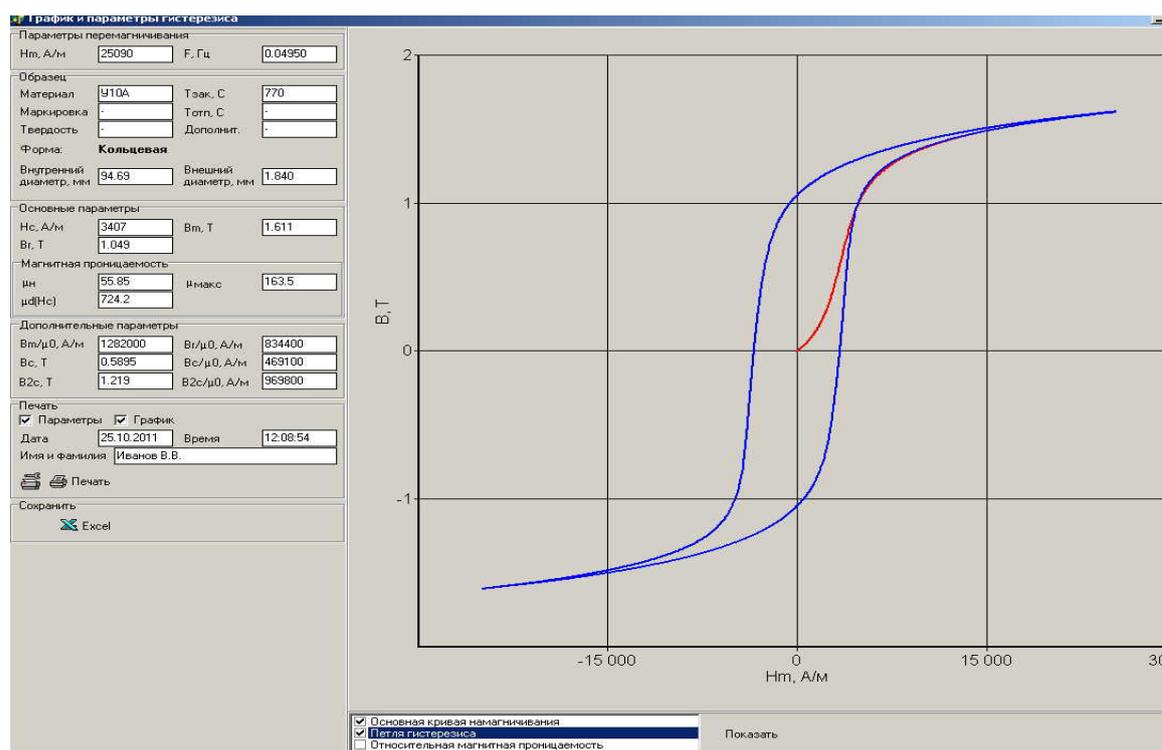


Рис. 9. Пример вывода результатов измерения для инструментальной стали У10А

На рисунке 9 приводится пример вывода результатов измерения для образца из инструментальной стали У10А (для этого необходимо

нажать на кнопку «График/Параметры»). Выводятся сведения об исследуемом образце (материал, маркировка, твердость, температура закалки, температура отпуска, его форма и размеры), петля гистерезиса, начальная кривая намагничивания, основные (H_c , B_r , H_m , B_m и μ_m) и дополнительные (величины индукции B_c и B_{2c} на начальной кривой намагничивания, соответственно, при поле, равном коэрцитивной силе, и при поле $H = 2H_c$) магнитные параметры ферромагнитного образца. Кроме того, выводятся дата и время измерения, имя и фамилия пользователя. Полученные данные можно распечатать на принтере и сохранить в формате Excel (тип файла: *.csv).

Чтобы сохранить в файле на диске персонального компьютера основные магнитные параметры и экспериментальные массивы, необходимо в главном окне программы нажать кнопку «Результаты» и в открывшемся окне выбрать требуемый пункт.

Общий вид установки УИМХ (без ПК и принтера) представлен на рисунке 10.



1 – блок управления; 2 – блок намагничивания; 3 – преобразователь

Рис. 10. Общий вид установки УИМХ

3.5. Технические характеристики установки УИМХ

Установка для измерения магнитных характеристик (УИМХ) предназначена для измерения начальной кривой намагничивания, предельной и частных петель магнитного гистерезиса, а также их основных (максимальная μ_m магнитная проницаемость, остаточная магнитная индукция B_r , коэрцитивная сила H_c по индукции, максимальная напряженность H_m намагничивающего поля, максимальная индукция B_m , намагниченность M_s насыщения) и дополнительных (начальная μ_n магнитная проницаемость, напряженность $H_{\mu m}$ намагничивающего поля, при котором достигается μ_m , и соответствующая ей магнитная индукция $B_{\mu dm}$; магнитные индукции $B_{\mu m}$, B_{Hc} и B_{2Hc} при намагничивающем поле, равном соответственно $H_{\mu m}$, коэрцитивной силе H_c и двум коэрцитивным силам $2H_c$; релаксационные коэрцитивная сила H_r , магнитная индукция B_{Hr} и магнитная проницаемость μ_r ; остаточная магнитная индукция B_{rc} после снятия поля, равного H_c ; потери на гистерезис P_r и коэффициент прямоугольности k_p), параметров магнитомягких материалов и изделий из них (при соответствующих изменениях в программном обеспечении установки можно определять и другие из перечисленных в начале статьи параметры).

Измерение магнитных параметров ферромагнитных материалов осуществляется на образцах в виде колец, а изделий – на образцах в виде цилиндров и параллелепипедов. При измерениях на кольцевых образцах значения магнитной индукции могут быть пересчитаны в соответствующие значения намагниченности.

Используя дополнительный программный модуль по результатам измерения в замкнутой магнитной цепи, можно определить внутреннее магнитное поле и намагниченность образца конечных размеров в разомкнутой магнитной цепи.

Область применения – измерения магнитных свойств материалов и изделий в науке и технике, неразрушающий контроль качества термической обработки, механических свойств и структуры ферромагнитных материалов и изделий на предприятиях металлургии и машиностроения.

Установка предназначена для работы в закрытых помещениях в интервале температур от +10 до +25 °С при относительной влажности до 80 %.

Основные параметры и характеристики

1. Частота перемагничивания, Гц	0,05–0,5
2. Пределы изменения напряженности перемагничивающего поля, кА/м, не менее	±40
3. Пределы измерения магнитной индукции, Тл, не менее ...	±2,5
4. Относительная погрешность измерения напряженности магнитного поля, %, не более	(2+300/H)
5. Относительная погрешность измерения магнитной индукции, %, не более	2
6. Дополнительная относительная погрешность, обусловленная дрейфом показаний за 60 с, %, не более	0,2
7. Производительность (максимальное время измерения полной петли гистерезиса), мин, не более.....	5
8. Минимальное значение измеряемого магнитного потока, мкВб	14
9. Минимальное сечение образца испытываемого материала (при $M_s \geq 2 \cdot 10^6$ А/м), мм ²	7
10. Максимальное сечение образца, мм ²	200
11. Размеры образцов для измерения в разомкнутой магнитной цепи:	
минимальная длина, мм	30
максимальная длина, мм	200
ширина, мм, не более	20
толщина, мм, не более	10
12. Размеры кольцевых образцов	
минимальный внутренний радиус, мм.....	10
максимальный внутренний радиус, мм	100
13. Отношение внешнего радиуса кольцевого образца к внутреннему (для замкнутой магнитной цепи), не более..	1,3
14. Время непрерывной работы изделия, ч, не менее	8
15. Установка сохраняет свои технические характеристики при питании ее от сети переменного тока:	
напряжением, В	220±11
частотой, Гц	50±0,5
16. Потребляемая мощность (без учета ПК и принтера), В·А, не более.....	1000
17. Масса установки (без ПК и принтера), кг, не более	95

18. Габариты установки, мм, не более

блока намагничивания (длина×ширина×высота)...	(560×500×220)
блока управления (длина×ширина×высота).....	(560×500×180)
преобразователя (длина×ширина×высота).....	(410×150×300)

Установка работает в комплекте с РС IBM не ниже 486 с установленной операционной системой Windows 2000.

Заключение

1. Новый метод введения поправки в канал измерения магнитной индукции позволил при частоте перемагничивания 0,05 Гц снизить до 0,4 % погрешность из-за дрейфа измерительного канала.

2. Введение двух пар компенсирующих обмоток с регулировкой их положения относительно оси соленоида при проведении измерений в разомкнутой магнитной цепи обеспечивает требуемую нормативными документами однородность магнитного поля вдоль оси в рабочей области преобразователя при минимальных его размерах.

3. Разработанная установка для измерения магнитных характеристик (УИМХ) магнитомягких материалов и изделий в квазистатическом режиме перемагничивания (0,05–0,5 Гц) обеспечивает построение начальной кривой намагничивания, предельной и частных петель магнитного гистерезиса, измерение их основных параметров с погрешностью не более 4 % и определение дополнительных магнитных параметров для целей магнитного структурного анализа.

Литература

1. МАТЕРИАЛЫ МАГНИТОМЯГКИЕ. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик: ГОСТ 8.377-80 ГСИ. – Введ. с 01.07.1980 г. – М.: Издательство стандартов, 1980. – 21 с.
2. Янус Р.И. Магнитная дефектоскопия. – М.-Л.: ОГИЗ, 1946. – 171 с.
3. Мельгуй М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей. – Минск: Наука и техника, 1980. – 184 с.
4. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. – М.: Наука, 1993. – 252 с.
5. Щербинин В.Е., Горкунов Э.С. Магнитный контроль качества материалов. – Екатеринбург: УО РАН, ИФМ, 1996. – 265 с.
6. Бида Г.В. Магнитные свойства термоупрочненных сталей и неразрушающий контроль их качества. – М.: Маршрут, 2006. – 304 с.

7. Гордон В.И., Антонов В.Г. Оценка возможности применения метода ступенчатого намагничивания для точного измерения статических магнитных параметров ферромагнитных материалов. – Метрология, 1982, № 6, с. 48–55.
8. Шихин А.Л., Сергеев В.Г., Тугарин В.Г. Магнитоизмерительные комплексы для испытания магнитных материалов и систем. – Метрология, 1983, № 9, с. 41–49.
9. Антонов В.Г., Петров Л.М., Щелкин А.П. Средства измерения магнитных параметров материалов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 216 с.
10. Горкунов Э.С., Петров Р.П., Кадров А.В., Красильников И.Н. Автоматизированный комплекс для магнитных измерений на базе микро-ЭВМ и аппаратуры КАМАК. – Дефектоскопия, 1987, № 8, с. 56–60.
11. Мельгуй М.А., Осипов А.А. Установка для измерения динамических и квазистатических магнитных характеристик. – Дефектоскопия, 1991, № 3, с. 34–39.
12. Горкунов Э.С., Махов В.Н., Поволоцкая А.М., Тузанкин С.В., Субботин Ю.С., Лапидус Б.М. Магнито-измерительный комплекс для магнитоструктурных исследований. – Дефектоскопия, 1999, № 3, с. 78–84.
13. Дидик Ю.И., Корзунин Г.С., Дидик М.Ю. Установка для измерения магнитных свойств магнитомягких материалов в импульсном режиме перемагничивания. – Дефектоскопия, 2001, № 7, с. 13–24.
14. Испытания магнитных материалов и систем / Комаров Е.В., Покровский А.Д., Сергеев В.Г., Шихин А.Я. Под ред. А.Я. Шихина. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 376 с.
15. Чечерников В.И. Магнитные измерения. М.: МГУ, 1969. – 387 с.
16. Кифер И.И. Испытания ферромагнитных материалов. – М.: Энергия, 1969. – 360 с.
17. Зубко С.А., Трусов Н.К. К теории измерения статических магнитных параметров ферромагнитных материалов методом угловых колебаний. – Весці АН БССР. Сер.фіз.-тэхн. навук. 1979, № 1, с. 110 – 113.
18. Зубко С.А., Кулагин В.Н., Трусов Н.К. Преобразователь для измерения потока магнитной индукции в поперечном сечении вибрирующих ферромагнитных стержней. I. Теория. – Весці АН БССР. Сер.фіз.-тэхн. навук. 1983, №2, с. 95–100.
19. Зубко С.А., Кулагин В.Н., Трусов Н.К. Преобразователь для измерения потока магнитной индукции в поперечном сечении вибрирующих ферромагнитных стержней. II. Эксперимент. – Весці АН БССР. Сер.фіз.-тэхн. навук. 1983, № 3, с. 90–94.
20. Чернышев Е.Т., Чечурина Е.Н., Чернышева Н.Г., Студенцов Н.С. Магнитные измерения. – М.: Издательство стандартов, 1969. – 248 с.
21. Шихин А.Я. Автоматические магнитоизмерительные системы – М.: Энергия, 1977. – 136 с.
22. Антонов В.Г., Гребенюк Н.В., Короленко В.И., Окон П.И., Хорев В.Н. Эталонная измерительная установка для воспроизведения и передачи размера единицы магнитного потока в нелинейно-гистерезисных средах. – Измерительная техника, 1987, № 4, с. 49–50.
23. Антонов В.Г., Гребенюк Н.В. Комплекс средств поверки аппаратуры для измерения статических магнитных параметров магнитомягких материалов. – В кн.: Совершенствование методов и средств поверки магнитоизмерительной аппаратуры, используемой для контроля качества магнитных материалов. Сб.

- научн. трудов НПО ВНИИ метрологии им. Менделеева. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – С. 14–21.
24. Студенцов, Н.В. Выбор размеров кольцевых образцов при испытании ферромагнитных материалов / Н.В. Студенцов // Измерительная техника. – 1967. – № 6. – С. 83–86.
 25. Матюк В.Ф., Осипов А.А., Делендик М.Н. Методика подготовки кольцевых образцов для магнитных измерений. – В кн.: Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов. Материалы международной научно-технич. конф. Могилев, 20-22 октября 2004 г. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2004, с. 66–67.
 26. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств: ГОСТ 12119.1-98. – Введ. 01.07.1967. – М: Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР, 1972. – 38 с.
 27. Материалы магнитомягкие. Методы испытания в постоянных полях: ГОСТ 15058-69. – Введ. 01.07.1970 г. – М: Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при СМ СССР, 1969. – 20 с.
 28. Матюк В.Ф., Осипов А.А., Пиунов В.Д. Намагничивающее устройство для магнитоизмерительных систем. – Патент РБ на полезную модель № 2168. – Афіцыйны бюлетэнь, 2005, № 3, ч. II, с. 101.
 29. Луганский Л.Б. Расчет соленоида с заданным распределением магнитного поля. – ЖТФ, 1985, т. 55, вып. 7, с. 1263-1271.
 30. Вонсовский С.В., Шур Я.С. Ферромагнетизм. – М.-Л.: ОГИЗ, 1948. – 816 с.
 31. Сильванский И.В., Шихин А.Я., Яковлев В.В. Исследование ферромагнитных материалов в условиях медленно изменяющегося магнитного поля. – В кн.: Проблемы магнитных измерений магнитоизмерительной аппаратуры. Труды метрологических институтов СССР, 1971, вып. 133, с. 161–169.
 32. Марочник сталей и сплавов/ В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др.; Под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
 33. Матюк В.Ф., Осипов А.А. Устройство для измерения магнитных характеристик ферромагнитных материалов. Патент РБ на полезную модель № 3195. – Афіцыйны бюлетэнь, 2006, № 6, с. 216–217.
 34. Матюк В.Ф., Осипов А.А. Установка УИМХ для измерения магнитных характеристик магнитомягких материалов и изделий. – Дефектоскопия, 2007, № 3, с. 12–25.

Статья поступила в редакцию 26.10.11

УДК 620.179.1

**Неразрушающий контроль в промышленности.
Акустический контроль**
Nondestructive Testing in Industry. Acoustic 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 акустического метода для решения различных задач в области неразрушающего контроля.

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

Методы неразрушающего контроля основываются на наблюдении, регистрации и анализе результатов взаимодействия физических полей (излучений) или веществ с объектом контроля, причем характер этого взаимодействия зависит от химического состава, строения, состояния структуры контролируемого объекта и т.п. Все методы неразрушающего контроля являются косвенными методами.

Настройка, калибровка должны осуществляться по контрольным образцам, имитирующим измеряемый физический параметр. Метода, который бы мог обнаружить самые разнообразные по характеру дефекты, нет. Каждый отдельно взятый метод НК решает ограниченный круг задач технического контроля.

Выбор оптимального метода неразрушающего контроля следует осуществлять исходя из его:

- реальных особенностей;
- физических основ;
- степени разработки;
- области применения;
- чувствительности;
- разрешающей способности;
- технических условий отбраковки;
- технических характеристик аппаратуры.

Измерительная система средств неразрушающего контроля, как правило, должна состоять из прибора, преобразователя и контрольного образца.

Важной характеристикой любых методов неразрушающего контроля является их чувствительность.

Чувствительность – выявление наименьшего по размерам дефекта; зависит от особенностей метода неразрушающего контроля, условий проведения контроля, материала изделий. Удовлетворительная чувствительность для выявления одних дефектов может быть совершенно непригодной для выявления дефектов другого характера.

Чувствительность методов неразрушающего контроля к выявлению одного и того же по характеру дефекта различна. При определении предельно допустимой погрешности выбранного метода неразрушающего контроля следует обязательно учитывать дополнительные погрешности, возникающие от влияющих факторов:

минимального радиуса кривизны вогнутой и выпуклой поверхностей;

шероховатости контролируемой поверхности;

структуры материала;

геометрических размеров зоны контроля;

других влияющих факторов, указанных в инструкциях для конкретных приборов.

В зависимости от физических явлений, положенных в основу методов неразрушающего контроля, они подразделяются на девять основных видов: акустический, магнитный, вихретоковый, проникающими веществами, радиоволновый, радиационный, оптический, тепловой и электрический.

Возможности и основы магнитного контроля мы рассмотрели в [1]. Начали мы с него, поскольку это один из первых методов неразрушающего контроля, который нашел широкое применение в промышленности. В настоящей работе мы рассмотрим наиболее распространенный вид контроля – акустический.

К акустическим методам неразрушающего контроля относят обширную область испытания материалов и изделий, основанную на применении упругих колебаний и волн, точнее, на регистрации параметров упругих волн, возбуждаемых или возникающих в объекте неразрушающего контроля.

Для акустического метода неразрушающего контроля применяют колебания ультразвукового и звукового диапазонов частотой от 20 Гц до 30 МГц. Интенсивность колебаний обычно невелика, не превышает 1 кВт/м². Такие колебания происходят в области упругих деформаций среды, где напряжения и деформации связаны пропорциональной зависимостью (область линейной акустики).

Методы неразрушающего акустического контроля широко применяют благодаря ряду их преимуществ: волны легко вводятся в объект контроля, хорошо распространяются в металлах, бетоне и других

материалах; эффективны при выявлении дефектов с малым раскрытием, чувствительны к изменению структуры и физико-механических свойств материалов, не представляют опасности для персонала. Использование различных типов волн (продольных, поперечных, поверхностных, нормальных и других) расширяет возможности акустических методов неразрушающего контроля.

Главная отличительная особенность данного метода состоит в том, что в нем применяют и регистрируют не электромагнитные, а упругие волны, параметры которых тесно связаны с такими свойствами материалов, как упругость, плотность, анизотропия (неравномерность свойств по различным направлениям) и др.

Акустические свойства твердых материалов и воздуха настолько сильно отличаются, что акустические волны отражаются от тончайших зазоров (трещин, непроваров) шириной $10^{-6} \dots 10^{-4}$ мм. Этот вид контроля применим ко всем материалам, достаточно хорошо проводящим акустические волны. Колебания в исследуемый объект вводятся в импульсном или непрерывном режимах с помощью пьезоэлектрического преобразователя сухим контактным, контактным через жидкую среду или бесконтактным способом через воздушный зазор с помощью электромагнитно-акустического преобразователя. Эти методы имеют следующие недостатки: необходимость акустического контакта преобразователя с объектом контроля, повышенные требования к чистоте поверхности изделия, влияние сторонних шумов на результаты измерений, воздействие температуры изделия и др. Все эти недостатки приводят к возрастанию погрешностей измерения.

Акустические методы неразрушающего контроля решают следующие контрольно-измерительные задачи:

метод прошедшего излучения выявляет глубинные дефекты типа нарушения сплошности, расслоения, непроклёп, непропаи;

метод отраженного излучения обнаруживает дефекты типа нарушения сплошности, определяет их координаты, размеры, ориентацию путем прозвучивания изделия и приема отраженного от дефекта эхо-сигнала;

резонансный метод применяется в основном для измерения толщины изделия (иногда применяют для обнаружения зоны коррозионного поражения, непропаев, расслоений в тонких местах из металлов);

акустико-эмиссионный метод обнаруживает и регистрирует только развивающиеся трещины или способные к развитию под действием механической нагрузки (квалифицирует дефекты не по размерам, а по степени их опасности во время эксплуатации). Метод имеет

высокую чувствительность к росту дефектов – обнаруживает увеличение трещины на (1...10) мкм, причём измерения, как правило, проходят в рабочих условиях при наличии механических и электрических шумов;

импедансный метод предназначен для контроля клеевых, сварных и паяных соединений, имеющих тонкую обшивку, приклеенную или припаянную к элементам жесткости. Дефекты клеевых и паяных соединений выявляются только со стороны ввода упругих колебаний;

метод свободных колебаний применяется для обнаружения глобальных дефектов.

Среди разнообразных акустических методов можно выделить следующие:

топографический метод, который основан на возбуждении в исследуемом изделии мощных изгибных колебаний заданной или меняющейся частоты с одновременной визуализацией картины колебаний контролируемой поверхности путем нанесения на нее тонкодисперсного порошка;

импульсный эхо-метод, основанный на посылке коротких ультразвуковых импульсов и отражении их от поверхности дефекта;

теневой метод, связанный с появлением области “звуковой тени” за дефектом, поперечные размеры которого превышают длину упругой волны;

резонансный метод, в основе реализации которого положено явление возникновения в исследуемом материале стоячих продольных или сдвиговых волн;

импедансный метод, основанный на установлении зависимости силы реакции изделия на контактирующий с ним колеблющийся стержень (преобразователь);

метод акустической эмиссии, основанный на регистрации упругих волн ультразвукового диапазона, скачкообразно появляющихся при перестройке структуры материала, возникновении трещин, аллотропических превращениях в кристаллической решетке;

электромагнитно-акустический метод, основанный на возбуждении ультразвуковых колебаний в результате взаимодействия переменного и постоянного магнитных полей с металлом или ферромагнетиком.

Мировой опыт показывает, что использование средств ультразвукового неразрушающего контроля в машиностроении, металлургии, энергетике, строительстве, транспортной промышленности способствует улучшению качества продукции, обеспечению безаварийной эксплуатации энергетических установок и транспортных средств,

повышению производительности труда, снижению материалоемкости конструкций и сооружений, улучшению качества выпускаемой продукции, экономии сырьевых и трудовых ресурсов.

Акустический метод неразрушающего контроля находит свое применение в различных областях: котлонадзор, системы газоснабжения, подъемные сооружения, объекты горнорудной промышленности, объекты угольной промышленности, нефтяная и газовая промышленность, металлургическая промышленность, оборудование взрывопожароопасных и химически опасных производств, объекты железнодорожного транспорта, объекты хранения и переработки зерна.

Подробную информацию об акустических методах контроля можно найти в [3]. В этом справочнике рассмотрены физические основы высокочастотных и низкочастотных акустических методов, их классификация, области применения, эксплуатационные возможности и особенности. Даны сведения об аппаратуре и методиках контроля типовых изделий. Приведены рекомендации по выбору метода для решения конкретных задач, а также рекомендации ICNDT WN 16-85 изм. 01 и Европейские стандарты по ультразвуковому контролю.

Из используемых акустических методов неразрушающего контроля наибольшее практическое применение находит эхо-метод. Около 90% объектов, контролируемых акустическими методами неразрушающего контроля, проверяют эхо-методом, применяя различные типы волн. С его помощью решают задачи дефектоскопии поковок, отливок, сварных соединений, многих неметаллических материалов. Эхо-метод используют также для измерения размеров изделий.

Зеркально-теневой метод акустического контроля используют вместо или в дополнение к эхо-методу для выявления дефектов, дающих слабое отражение ультразвуковых волн в направлении раздельно-совмещенного преобразователя (например, вертикальные трещины).

Эхо-зеркальный метод акустического контроля также применяют для выявления дефектов, ориентированных перпендикулярно поверхности ввода. При этом он обеспечивает более высокую чувствительность к таким дефектам, но требует, чтобы в зоне расположения дефектов был достаточно большой участок ровной поверхности. В рельсах, например, это требование не выполняется, поэтому там возможно применение только зеркально-теневого метода. Эхо-зеркальный метод в варианте "тандем" используют для выявления вертикальных трещин и непроваров при неразрушающем контроле сварных соединений. Дефекты некоторых видов сварки, например,

непровар при электронно-лучевой сварке, имеют гладкую отражающую поверхность, очень слабо рассеивающую ультразвуковые волны, но такие дефекты хорошо выявляются эхо-зеркальным методом.

Вариант "косой тандем" применяют, когда расположение преобразователей в одной плоскости затруднительно. Его используют, например, для выявления поперечных трещин в сварных швах.

Дельта и дифракционно-временной методы также используют для получения дополнительной информации о дефектах при неразрушающем контроле сварных соединений.

Теневой и эхо-сквозной методы используют только при двустороннем доступе к изделию, для автоматического контроля изделий простой формы, например, листов в иммерсионной ванне.

Теневой метод применяют также для контроля изделий с большим уровнем структурной реверберации, т.е. шумов, связанных с отражением ультразвука от неоднородностей, крупных зерен, дефектоскопии многослойных конструкций и изделий из слоистых пластиков.

Локальный метод вынужденных колебаний применяют для измерения малых трещин при одностороннем доступе.

Интегральный метод вынужденных колебаний применяют для определения модулей упругости материала по резонансным частотам продольных, изгибных или крутильных колебаний образцов простой формы, вырезанных из материала изделия, т.е. при разрушающих испытаниях. В последнее время этот метод используют также для неразрушающего контроля небольших изделий: абразивных кругов, турбинных лопаток.

Интегральный метод свободных колебаний используют для проверки бандажей вагонных колес или стеклянной посуды "по чистоте звона" с субъективной оценкой результатов на слух.

Реверберационный, импедансный, велосимметрический, акустико-топографический методы и локальный метод свободных колебаний используют в основном для контроля многослойных конструкций. Реверберационным методом обнаруживают, в основном, нарушения соединений металлических слоев (обшивок) с металлическими или неметаллическими силовыми элементами или наполнителями. Импедансным методом выявляют дефекты соединений в многослойных конструкциях из композиционных полимерных материалов и металлов, применяемых в различных сочетаниях. Велосимметрическим методом и локальным методом свободных колебаний контролируют, в основном, изделия из полимерных композиционных материалов. Акустико-топографический метод применяют для обнаружения де-

фектов преимущественно в металлических многослойных конструкциях (сотовые панели, биметаллы и т.п.).

Вибрационно-диагностический и шумо-диагностический методы служат для диагностики работающих механизмов. Метод акустической эмиссии применяют в качестве средства исследования материалов, конструкций, контроля изделий (например, при гидроиспытаниях) и диагностики во время эксплуатации. Его важными преимуществами перед другими методами контроля является то, что он реагирует только на развивающиеся, действительно опасные дефекты, а также возможность проверки больших участков или даже всего изделия без сканирования его преобразователем. Основным его недостатком как средства контроля – трудность выделения сигналов от развивающихся дефектов на фоне помех (кавитационных пузырьков в жидкости, подаваемой в объект при гидроиспытаниях, трения в разъемных соединениях и т.д.).

Для возбуждения и регистрации ультразвуковых колебаний чаще всего используют пьезоэлектрический эффект: некоторые материалы (кварц, титанат бария, титанат-цирконат свинца и др.) под действием переменного электрического поля меняют свои размеры с частотой изменения поля. Пьезоэлектрическую пластину размещают в специальном устройстве – пьезопреобразователе. Пьезопреобразователи, предназначенные для ввода волны в направлении, перпендикулярном поверхности, называют прямыми, а для ввода под некоторым углом – наклонными. Пьезопреобразователи включаются по отдельной, совмещенной или отдельно-совмещенной схемам. В последнем случае в одном корпусе размещаются два пьезопреобразователя, разделенных между собой экраном. При падении ультразвуковой волны на поверхность раздела двух сред, в частности на границу дефекта, часть энергии отражается, что и используется при контроле. Для анализа распространения ультразвуковых колебаний в контролируемом изделии распространение получили три основных метода: теневой, зеркально-теневой и эхо-метод.

По характеру регистрации первичного информативного параметра акустические методы подразделяются на амплитудный, частотный, спектральный.

Традиционные характеристики, измеряемые при использовании ультразвукового метода контроля:

1. Скорость волны при прохождении ультразвука в объекте контроля. Это наиболее часто измеряемый параметр. В однородной среде она непосредственно зависит от плотности и соотносится с модулем

упругости. Таким образом, изменения скорости волны характеризует однородность материалов, изменения упругости или плотности.

2. Ослабление ультразвука. Энергия ультразвука поглощается или ослабляется с различной степенью в различных материалах под влиянием плотности, твердости, вязкости, структуры материала.

3. Рассеяние ультразвука. Ультразвуковые волны отражаются от границы между различными материалами. Изменения структуры зернистости, ориентации частиц и волокон, пористости оказывают влияние на амплитуду, направление и частотную составляющую.

4. Частотная составляющая – спектр сигнала. Все материалы могут быть рассмотрены как низкочастотные фильтры, ослабляя или снижая высокочастотную составляющую широкополосной ультразвуковой волны.

В некоторых случаях данные ультразвукового контроля, например о скорости ультразвука, могут непосредственно использоваться для расчета свойств материала, в частности модуля упругости. В других случаях ультразвуковой контроль используется для сопоставительного анализа свойств материалов, при необходимости экспериментальной оценки стандартных образцов из материала объекта контроля. У таких стандартных образцов при их акустическом зондировании можно зафиксировать соответствие изменений значений параметра ультразвука конкретным свойствам материала, после чего, опираясь на эти данные, можно определять или предсказывать аналогичные изменения в реальных объектах контроля.

Для анализа свойств материалов могут быть использованы различные ультразвуковые приборы с аналоговой или цифровой обработкой сигналов. Измерение скорости ультразвука используется для определения толщины с помощью ультразвуковых толщиномеров. Величина изменения скорости ультразвука, степень его ослабления или рассеяния измеряются современными цифровыми дефектоскопами. Генераторы приемники с соответствующим дополнительным оборудованием, а также системы формирования акустических изображений и программное обеспечение могут быть использованы для проведения спектрального анализа (частотной составляющей) ультразвуковых эхосигналов.

Примеры некоторых свойств материалов, для анализа которых может быть использован ультразвук:

- модули упругости: модуль Юнга и модуль сдвига могут быть рассчитаны на основании измерений скорости продольных и поперечных ультразвуковых волн (наряду с плотностью материала). Содержание графита в чугунах. На основании измерений скорости ульт-

тразвука могут быть определены как концентрация включений графита в чугуне, так и их форма;

- степень отверждения, например, смол, бетона, пластмасс (скорость ультразвука в этих материалах изменяется по мере их отверждения);

- концентрация жидкостей, плотность гидросмесей (коэффициент смешивания может быть соотнесен со скоростью ультразвука);

- размеры и распределение частиц, пористость (изменения размеров или распределения частиц и пористости) в твердых или жидких средах влияют на амплитуду и частоту рассеиваемого ультразвука, что используется для определения однородности обожженной керамики, изменений размеров зерен или их ориентации в стали, чугуне и других металлах при контроле качества сварных швов, глубины термообработки сталей);

- измерение очень высоких температур (свыше 3000 °С на основании данных об изменении скорости ультразвука в материале).

Ультразвуковая дефектоскопия. Наибольшее распространение ультразвуковой контроль получил в промышленности для контроля качества сварных соединений. Детальный обзор развития этого метода можно посмотреть в [2]. Основным технологическим процессом, применяющимся при изготовлении металлоконструкций, является сварка, от которой во многом зависят качество и надежность конструкций в целом. Несмотря на прогресс в развитии сварочной техники и технологии, в сварных соединениях по ряду причин возникают дефекты различного вида и размеров, приводящие к снижению их работоспособности и долговечности, а иногда к аварийным ситуациям. Для того чтобы исключить поступление в эксплуатацию сварных соединений с недопустимыми дефектами, необходимо применять эффективные методы неразрушающего контроля такие как ультразвуковая дефектоскопия. До появления ультразвуковой дефектоскопии основными методами контроля сварных соединений металлических конструкций были радиография и магнитография. Широко распространенный в некоторых отраслях промышленности радиографический контроль достаточно эффективен, но неприемлем для контроля сварных соединений арматуры железобетонных конструкций и малоэффективен при контроле сварных швов металлических конструкций большой толщины. Сложный профиль арматурных соединений практически не позволяет обнаруживать трещины и несплавления и затрудняет выявление объемных дефектов (вероятность выявления 50 %). В стыковых соединениях металлических конструкций этим методом уверенно обнаруживаются лишь объемные дефекты (поры и

шлаковые включения), а трещиноподобные дефекты, по данным многочисленных исследований, обнаруживаются с вероятностью 35...40%. Из-за низкой оперативности радиографического контроля невозможно своевременно предупредить брак. Кроме того, радиографический метод не лишен субъективности в оценке результатов контроля. Отмечается, что из 5600 заключений, выданных радиографами, в отличие от ультразвуковой дефектоскопии, верная оценка дана только в 3696 случаях (66 %), а при оценке качества сварных стыков газопроводов в пяти из девяти случаев ни один опытный радиограф не обнаружил трещины, которые были подтверждены металлографическим анализом. Вследствие этого в лабораториях разрабатывались другие методы неразрушающего контроля, одним из них и является ультразвуковая дефектоскопия.

Успешный опыт применения ультразвуковой дефектоскопии в некоторых других отраслях промышленности показал, что она может также эффективно использоваться для контроля практически всех типов сварных соединений, имеющих толщину основного материала более 4 мм. Кроме того, в таких случаях, как, например, при контроле сварных швов большой толщины, выполненных электрошлаковой сваркой, сварных соединений арматуры железобетонных конструкций ультразвуковая дефектоскопия является единственно приемлемым методом контроля.

Объем применения ультразвукового контроля как в ряде отраслей промышленности нашей страны (энергетическое машиностроение, железнодорожный транспорт, химическое машиностроение), так и за рубежом за последние годы достиг 70–80 %. Это объясняется более высокой чувствительностью и достоверностью (в 2–2,5 раза) к обнаружению трещиноподобных дефектов, более высокой оперативностью (15–20 раз) и производительностью (2–4 раза), меньшей стоимостью (2–6 раз) и безопасностью в работе по сравнению с традиционными методами радиографического контроля.

Информацию об ультразвуковых дефектоскопах можно найти на сайтах: <http://www.ndt.by/> (Ультразвуковые дефектоскопы: USM Vision, GE Phasor XS, USM35, Портативный дефектоскоп Spotchecker, A1220 АНКЕР, АКР1224М, А1214 ЭКСПЕРТ, А1212 МАСТЕР ПРОФИ, А1212 МАСТЕР ЛАЙТ, Дефектоскоп ультразвуковой USM GO, УД4-Т Томографик, УД3-103, УД2В-П46, УД2-70, УД4-76, УД3-71, УД4-94-ОКО-01 (02), USN60, USN58, USLT 2000);

<http://www.stroygeo.ru/catalog/group/ultrazvuk/> (дефектоскоп А1212, дефектоскоп УД2 102, дефектоскоп УД2 70, дефектоскоп УД4 Т, дефектоскоп УД3 71, дефектоскоп УД2 12);

<http://www.constant.ru/> (Приборы комплексного контроля качества покрытий, ультразвуковые толщиномеры металлов, ультразвуковые дефектоскопы и преобразователи к ним, твердомеры и другие приборы неразрушающего контроля...);

<http://www.panatest.ru/categorie?id=87> (ультразвуковые дефектоскопы фирм SONATEST, HARFANG). Дефектоскопы позволяют: обнаруживать дефекты, измерять координаты залегания дефектов и толщину с выводом информации на дисплей, измерять эквивалентную площадь и условные размеры дефектов. Они нашли широкое применение в энергетике, нефтегазовом комплексе, машиностроении, на транспорте и в других отраслях промышленности для контроля трубопроводов, сосудов, работающих под давлением, котлов, элементов транспортных и грузоподъемных механизмов.

Технология ультразвуковой фазированной решетки. Она основана на генерировании ультразвуковых волн и их интерференции. Преобразователь решетки представляет собой множество пьезоэлектрических элементов, собранных в один блок. Наиболее распространенное количество 32, 64 и 128 элементов в блоке. Программируемый генератор контролирует все элементы для формирования лучей. В результате интерференции волн, исходящих от всех элементов, формируется результирующая волна под требуемым углом ввода, и производится сканирование. Затем генератор меняет угол ввода результирующей волны, и процесс сканирования повторяется.

При использовании метода контроля фазированными решетками генерируется ультразвуковой луч с настраиваемыми углом ввода, фокусным расстоянием и размером фокусного пятна. При этом также можно настроить генерирование луча в разных секторах фазированной решетки. Эти функции открывают целый ряд новых возможностей. Например, можно быстро изменить параметры угла и изменить направление сканирования, не передвигая датчик. Таким образом, эта технология заменяет собой целую гамму датчиков. При контроле лучом с переменным углом коэффициент обнаружения дефектов, как правило, выше вне зависимости от их ориентации. При этом соотношение сигнал-шум остается оптимальным.

Метод фазированной решетки более совершенен по сравнению с традиционным ультразвуковым контролем, в котором используется одноэлементный преобразователь. Многие прикладные задачи дефектоскопии при техническом диагностировании используют фазированные решетки, благодаря которым контроль осуществляется гораздо быстрее, качественнее и проще. Метод фазированных решеток имеет неоспоримые преимущества: высокая скорость контроля, высо-

кая вероятность обнаружения дефектов, расширенные возможности по составлению отчетов, улучшенная визуализация процесса контроля, повторяемость результатов и использование одного датчика для всех углов.

Это указывает на то, что возможности ультразвукового контроля постоянно возрастают. Совершенствуется теоретическая база, развивается аппаратура, улучшается интерфейс приборов. Визуализация контроля также идет в ногу со временем: для облегчения работы оператора в дефектоскопах применяются цветные LCD мониторы с подробной детализацией. Развитие методик документирования и архивирования результатов контроля выводит ультразвуковой контроль на принципиально новый уровень. Если раньше протокол контроля составлялся непосредственно со слов дефектоскописта, то сейчас оборудование позволяет производить автоматическую запись результатов контроля в файл и составлять трехмерное изображение обнаруженных дефектов.

Современная аппаратура и технологии ультразвукового контроля являются актуальным и удобным инструментом для решения экспертных задач. Возможность документирования результатов контроля при техническом диагностировании оборудования позволяет эксперту при необходимости воссоздать процесс контроля, более детально изучить структуру сварного шва или металла в нужной зоне, проанализировать обнаруженные специалистом дефекты для принятия того или иного решения по оценке технического состояния конструкции.

Ультразвуковая толщинометрия. Ультразвуковой толщиномер – это электронный прибор, который используется при проведении контрольно-измерительных работ по определению толщины деталей или их элементов. Причем, исследуемые объекты могут быть изготовлены из различных металлов, керамики, пластмасс, алюминиевых и титановых конструкционных сплавов, стекла. Толщиномеры предназначены для контроля толщины стенок, будь то измерение толщины точных изделий или измерение остаточной толщины стенок, стенок труб и сосудов всех видов, подверженных износу изнутри. Они портативны, удобны в эксплуатации, имеют автономное питание.

Характеристики некоторые типы толщиномеров можно найти на сайтах: <http://www.usps.ru/ndt/top112/> (A1207, A1208, A1209, A1210, 37DL, 38DL, MG2, 26MG, ТУЗ-2, ТУЗ-3, УТ-80М, УТ-82 и др.) и <http://ruscontrol.com/ultrazvukovye-tolschinomery>.

Результатом толщинометрии является протокол замеров в указанных точках и схема расположения этих точек на чертеже оборудо-

вания. Особое распространение метод получил при техническом диагностировании нефте- газопроводов, сосудов, работающих под давлением, резервуаров, хранящих разнообразные химические вещества. Использование толщинометрии повышает качество диагностирования обследуемого объекта.

Инструкции по проведению ультразвукового контроля различных объектов можно найти на сайте http://fpribor.ru/use_inform/ndt_instructions/.

Ультразвуковые течеискатели. Для контроля герметичности систем, заполненных газом или жидкостью, могут быть использованы течеискатели, являющиеся приборами, которые обнаруживают места утечек. В качестве примера можно указать на прибор УТ-2А, который предназначен для контроля герметичности пневматических систем в процессе эксплуатации, поиска утечек в газовых сетях и наземных участках газопроводов, обнаружения утечки и определения места течи в протяженных и разветвленных системах при опрессовке и вакуумировании, а также для решения других важных технических задач. Прибор преобразовывает в электрический сигнал ультразвуковые волны, генерируемые вытекающей струей газа, работой неисправного подшипника, дуговым или коронным разрядом в трансформаторе. Затем фильтрует сигнал с целью исключения посторонних шумов и преобразовывает его для индикации. Течеискатель содержит направленный ультразвуковой микрофон, усилитель, фильтр верхних частот, преобразователь высокочастотного сигнала в слышимый, низкочастотный усилитель. Эти устройства вместе с питающим аккумулятором размещены в пластмассовом цилиндре с габаритами карманного фонаря; к разъему на его торце подключаются при работе головные телефоны. Прибор наиболее эффективен при контроле герметичности наземных газопроводов, сетей технологического газоснабжения в цехах и на заводских территориях, топливных систем газобаллонных автомобилей, при обследовании газовых сетей городского хозяйства. Целесообразно применение прибора для технического обслуживания поездов и линий метрополитена и железнодорожного транспорта, где широко применена пневматика. Менее чем за 10 минут прибор позволяет находить течь в системе трубопроводов технологического газоснабжения, распределенной на площади 2000 кв. м, на шумовом фоне работающих компрессоров, насосов и вентиляторов. Утечка гелия через отверстия сечением менее 0,02 кв. мм при давлении 0,2 атм. обнаруживается на расстоянии более 10 м. Для более "тяжелых" газов эффективность прибора выше.

Структуроскопия материалов. Одним из наиболее перспективных методов структуроскопии материалов является лазерно-ультразвуковая цифровая дефектоскопия. В данном методе используется лазерное возбуждение мощных апериодических ультразвуковых импульсов управляемой формы, облучение исследуемой среды этими импульсами, регистрации прошедших или рассеянных ультразвуковых возмущений с высоким временным разрешением и цифровая обработка временной формы получаемых сигналов, включающая спектральный и корреляционный анализ, цифровую фильтрацию, оптимальную фильтрацию и деконволюцию, wave-let анализ и др. Многопараметрический анализ данных позволяет не только увеличить чувствительность контроля, но и обеспечить его объективность и диагностические возможности.

Для контроля структуры материалов в большинстве случаев используют влияние структуры и фазового состава на затухание или скорость распространения ультразвуковых колебаний в металлах и сплавах. Например, для компании ОАО "Рославльский вагоноремонтный завод" была изготовлена установка по ультразвуковому контролю структуры металла черновой оси по РД 32.144-2003. Ось прозвучивается с торцов с обеих сторон и оценивается поглощение звуковых импульсов на неоднородностях структуры металла оси. Для этого амплитуду донного импульса от торца оси сравнивают со значением амплитуды донного импульса на стандартном образце СО-2, если амплитуда отличается больше чем на 46 дБ, то ось считается "непрозвучиваемой".

Для жидкостей важной характеристикой является их плотность. Например, она считается универсальным и наиболее доступным для измерения качественных показателей нефти и нефтепродуктов. Ее автоматизированное измерение позволяет контролировать процесс переработки нефти, отслеживать выпуск некондиционной продукции, сортировать выпускаемые нефтепродукты, контролировать качество принимаемых и отпускаемых нефтепродуктов, вести массовый учет нефтепродуктов. Постоянно разрабатываются новые автоматизированные средства измерения плотности, обеспечивающие регламентированную точность, способные работать в сильно изменяющихся климатических условиях, удовлетворяющие требованиям взрывобезопасности и доступные по цене.

Наиболее перспективным методом измерения плотности нефтепродуктов, удовлетворяющим вышеизложенным требованиям, считается ультразвуковой метод. Широкое распространение получили ультразвуковые плотномеры, основанные на измерении затухания ульт-

тразвуковых волн при прохождении через нефтепродукт. Метод измерения плотности, использующий непосредственное измерение скорости распространения ультразвуковых волн в нефтепродукте, до настоящего момента не нашел широкого применения из-за посредственных метрологических характеристик. Тем не менее, с учетом предварительного установления вида контролируемого нефтепродукта и пересчетных зависимостей, применение данного метода позволяет существенно упростить конструкцию первичных преобразователей и электронной схемы, обеспечить регламентируемую точность измерения плотности, существенно повысить его чувствительность и выполнить требования взрывозащиты.

Метод акустической эмиссии (АЭ). Этот метод основан на регистрации и анализе акустических волн, возникающих в процессе пластической деформации и разрушения (роста трещин) контролируемых объектов. Это позволяет формировать адекватную систему классификации дефектов и критерии оценки состояния объекта, основанные на реальном влиянии дефекта на объект. Другим источником АЭ контроля является истечение рабочего тела (жидкости или газа) через сквозные отверстия в контролируемом объекте. Особенности метода АЭ контроля, являются то, что он:

обеспечивает обнаружение и регистрацию только развивающихся дефектов, что позволяет классифицировать дефекты не по размерам, а по степени их опасности;

обладает весьма высокой чувствительностью к растущим дефектам (предельная чувствительность акустико-эмиссионной аппаратуры по теоретическим оценкам составляет порядка 10^{-6} мм², что соответствует выявлению скачка трещины протяженностью 1 мкм на величину 1 мкм);

обеспечивает контроль всего объекта с использованием одного или нескольких преобразователей АЭ контроля, неподвижно установленных на поверхности объекта;

позволяет проводить контроль различных технологических процессов.

Целью АЭ контроля является обнаружение, определение координат, мониторинг источников акустической эмиссии, а также для оценки скорости развития дефекта в целях заблаговременного предотвращения разрушения изделия. Регистрация АЭ позволяет определить образование свищей, сквозных трещин, протечек в уплотнениях, заглушках и фланцевых соединениях.

АЭ контроль технического состояния обследуемых объектов проводится только при создании в конструкции напряженного состо-

яния. Для этого объект подвергается нагружению силой, давлением, температурным полем и т.д.

Основные положения, порядок применения акустико-эмиссионного метода контроля сосудов, котлов, аппаратов и технологических трубопроводов и рекомендации по оценке результатов контроля, представлены на сайте <http://www.avek.ru/pages/23/>.

Классификацию источников АЭ выполняют с использованием следующих параметров сигналов: суммарного счета, числа импульсов, амплитуды (амплитудного распределения), энергии (либо энергетического параметра), скорости счета, активности, концентрации источников АЭ. В систему классификации также входят параметры нагружения контролируемого объекта и время.

Выявленные и идентифицированные источники АЭ рекомендуется разделять на четыре класса:

Источник I класса – пассивный источник.

Источник II класса – активный источник.

Источник III класса – критически активный источник.

Источник IV класса – катастрофически активный источник.

Выбор системы классификации источников АЭ и допустимого уровня (класса) источников рекомендуется осуществлять каждый раз при АЭ контроле конкретного объекта. Примеры систем для акустико-эмиссионного контроля представлены на сайте <http://www.ncontrol.ru/catalog/Akustiko-emiscionnyj-kontrol>.

Ультразвуковые датчики и контрольно-измерительные приборы. В промышленности широкое распространение получили ультразвуковые измерительные приборы, предназначенные для контроля различных рабочих параметров систем и процессов. Ультразвуковые датчики уровня жидкостей, уровня сыпучих материалов, расстояния служат для того, чтобы бесконтактно контролировать положение и габариты объектов самой разной природы и свойств. Такие датчики применяются в технологическом оборудовании с целью решения массы задач, среди которых и измерение уровней заполнения емкостей жидкостями и сыпучими материалами. Ультразвуковые датчики позволяют проводить контроль диаметра намотки материалов листового типа. Имеются специализированные ультразвуковые датчики для упаковочного и полиграфического оборудования. Специализированные ультразвуковые датчики, которые применяют в полиграфии или при упаковке продукта, дают возможность определять толщину полимерных пленок, бумаги и тканей, а также определяют положение кромки на материале.

Принцип работы ультразвуковых уровнемеров основан на том, что звуковые волны отражаются от препятствия, которыми являются объекты измерения. Излучатель ультразвукового уровнемера, расположенный в корпусе датчика, посылает ультразвуковые волны, часть которых отражается от объекта измерения и возвращается назад в приемник. В датчике принятый отраженный сигнал преобразуется встроенной электроникой в напряжение и обрабатывается ею. Преимущества ультразвуковых датчиков уровня очевидны, ведь отсутствует контакт с продуктом, а поэтому на уровнемере не образуются отложения. Приборы очень компактны, имеют надежную конструкцию, не имеют подвижных частей и практически не нуждаются в обслуживании.

Ультразвуковой расходомер существует для того, чтобы контролировать расход воды или тепла, вести учет расходования среды. В промышленности ультразвуковой расходомер применяется довольно давно. Ультразвуковой расходомер имеет массу достоинств: он надежен, потому что не имеет в составе подвижных механических элементов, к тому же он обладает малым гидравлическим сопротивлением. Ультразвуковой расходомер обеспечивает высокую точность измерения в короткий срок.

В этой статье мы остановились лишь на наиболее важных применениях ультразвукового метода контроля для решения технических задач. Каждый год количество задач, решаемых этим методом, возрастает, и даже просто перечислить в одной статье не представляется возможным.

Литература

1. Неразрушающий контроль в промышленности. Магнитный контроль. Горбаш В.Г., Делендик М.Н., Павленко П.Н. "Неразрушающий контроль и диагностика", №2, 2011.
2. Развитие методов ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений. Бархатов В.А.
3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. Ультразвуковой контроль. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 864 с.: ил.

Статья поступила в редакцию 19.12.11

**13-е заседание Рабочей группы
по неразрушающему контролю научно-технической
комиссии по метрологии МГС**

В.В. Федоров

*ведущий инженер производственно-исследовательского отдела
радиоэлектронных измерений БелГИМ*

13-е заседание Рабочей группы по неразрушающему контролю научно-технической комиссии по метрологии МГС (РГ по НК НТКМетр) состоялось 25 октября 2011 г. в Агентстве «Узстандарт», г. Ташкент. В работе заседания приняли участие представители шести стран – Азербайджана, Беларуси, Кыргызстана, России, Узбекистана, Украины. На заседании были рассмотрены следующие вопросы:

1. О выполнении решений и рекомендаций, принятых на предыдущих заседаниях МГС, НТКМетр и РГ по неразрушающему контролю;
2. О работах, проводимых национальными органами в области неразрушающего контроля (обмен опытом работы, информационными материалами);
3. О ходе выполнения мероприятий «Программы работ по стандартизации, метрологии и оценке соответствия в области неразрушающего контроля»;
4. О подготовке пакета документов по взаимному признанию результатов аккредитации ЛНК;
5. О ходе разработки межгосударственного стандарта на основе ЕН 12668 «Контроль неразрушающий. Технические характеристики и проверка ультразвукового оборудования неразрушающего контроля»;
6. О разработке межгосударственного стандарта на основе международного стандарта «Контроль неразрушающий. Квалификация и сертификация персонала» (внедрение ISO 9712:2005);

7. О разработке межгосударственных стандартов на ультразвуковой метод измерения толщины на основе европейских стандартов EN 14127 «Контроль неразрушающий. Ультразвуковая толщинометрия» и EN 15317 «Контроль неразрушающий. Ультразвуковой контроль. Основные технические характеристики оборудования для ультразвуковой толщинометрии и методы их измерений»;

8. О разработке проекта ПМГ «Правила обеспечения безопасности особо опасных и ответственных объектов. Организация и порядок проведения работ при выполнении неразрушающего контроля»;

9. О проекте межгосударственного стандарта «Контроль неразрушающий. Порядок разработки и проведения аттестации методик неразрушающего контроля»;

10. О предложениях в проект повестки 35-го заседания НТКМетр;

11. О дате и месте проведения 14-го заседания РГ НК НТКМетр.

На заседании была актуализирована программа работ по стандартизации, метрологии и оценке соответствия в области неразрушающего контроля и предложено утвердить актуализированную программу на очередном заседании НТКМетр. Актуализированная программа работ и другие материалы заседания будут в ближайшее время размещены в свободном доступе на официальном сайте Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации (easc.org.by) в разделе «Заседания – Рабочая группа по неразрушающему контролю НТКМетр».

Статья поступила в редакцию 07.12.11

Научно-практический семинар «Актуальные вопросы проведения неразрушающего контроля объектов повышенной опасности»

Е.Н. Белая

начальник отдела «Орган по сертификации профессиональной компетентности персонала в области неразрушающего контроля»,
Республиканский институт высшей школы (РИВШ), г. Минск

И.А. Михайлюк

проректор РИВШ, г. Минск

Проведение Органом по сертификации профессиональной компетентности персонала в области неразрушающего контроля РИВШ ежегодных республиканских семинаров под методическим руководством Госпромнадзора Республики Беларусь по актуальным вопросам неразрушающего контроля и технического диагностирования объектов повышенной опасности уже стало хорошей традицией. Как правило, в ежегодных встречах принимают участие как руководители организаций и ведущие специалисты в области неразрушающего контроля Республики Беларусь, так и зарубежные специалисты из Российской Федерации, Украины, Польши, Германии и других стран. На протяжении последних лет семинар является значимым событием в области неразрушающего контроля и пользуется возрастающим вниманием.

Научно-практический семинар, организованный органом по сертификации профессиональной компетентности персонала в области неразрушающего контроля РИВШ 17–18 ноября 2011 года, стал уже пятым ежегодным семинаром. Семинар проходил под методическим руководством Департамента по надзору за безопасным ведением работ в промышленности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь с участием ведущих российских и белорусских специалистов в области неразрушающего контроля и экспертизы промышленной безопасности. В его работе приняли участие более 40 специалистов.

На открытии семинара с приветственным словом к участникам обратился первый заместитель начальника Госпромнадзора Г.Г. Решко. Он обратил внимание на важность и актуальность проведения таких встреч и обмена опытом между специалистами и пожелал участникам семинара плодотворной работы, выработки современных решений и более активного внедрения высокоэффективных технологий

неразрушающего контроля при техническом диагностировании объектов повышенной опасности.

За два дня работы семинара было представлено 8 докладов по актуальным вопросам неразрушающего контроля.

С основным докладом на тему «Состояние объектов повышенной опасности, уровень технического диагностирования и неразрушающего контроля, проблемы и пути решения» выступил Г.Г. Решко. Он проанализировал текущее состояние объектов повышенной опасности, роль неразрушающего контроля и технического диагностирования и основные тенденции развития, подробно остановился на вопросах экспертизы промышленной безопасности.

Важным и, несомненно, актуальным был доклад начальника управления экспертизы Госпромнадзора Ю.П. Прохнича об основных несоответствиях, выявляемых при лицензировании организаций на право осуществления технического диагностирования объектов, подконтрольных Госпромнадзору. Рекомендации и замечания, высказанные в его докладе, являются очень полезными в деле совершенствования и развития как профессиональной компетентности персонала лабораторий неразрушающего контроля, так и развития их материальной и приборной базы.

С большим интересом был заслушан доклад А.А. Травкина – руководителя экзаменационного центра Органа по сертификации профессиональной компетентности персонала в области неразрушающего контроля и технической диагностики «СертиНК» Федерального государственного учреждения «Сварка и контроль» Московского государственного технического университета им. Баумана (г. Москва, Российская Федерация). В своем выступлении А.А. Травкин подробно рассказал об истории развития системы экспертизы промышленной безопасности в Российской Федерации, об этапах создания нормативной правовой базы в области экспертизы промышленной безопасности, о системе аккредитации экспертных организаций и систему аттестации экспертов в области промышленной безопасности. Отдельно он остановился на требованиях к кандидатам в эксперты, о процедуре проведения аттестации экспертов и программах предварительной подготовки экспертов в России. Доклад А.А. Травкина явился очень актуальным и интересным как в свете решений и поручений семинара по актуальным вопросам и проблемам проведения неразрушающего контроля в Республике Беларусь, который прошел 27 сентября 2011 под руководством Госпромнадзора на базе РИВШ, так и в целом в све-

те более тесной интеграции Российской Федерации и Республики Беларусь в рамках Таможенного союза.

Активный интерес участников вызвало также выступление директора приборного направления ООО «ИНТЕРЮНИС» (г. Москва, Российская Федерация) С.В. Елизарова, который представил новейший многофункциональный прибор «UNISCOPE». На данный момент на базе единой аппаратной платформы прибор объединяет в себе 2-х канальную АЭ систему с передовыми характеристиками, акустический течеискатель, тензоизмеритель и виброметр. Он рассказал, что в настоящее время в разработке находятся дополнительные функции «UNISCOPE», которые в перспективе позволят использовать его как ультразвуковой толщиномер, генератор тестовых электрических и упругих импульсов, интегральный толщиномер, измеритель электрохимических потенциалов и блуждающих токов, вихретоковый дефектоскоп и магнитометр. Новая разработка российских ученых направлена на повышение качества и автоматизацию проведения неразрушающего контроля.

Со своими предложениями по разработке технических нормативных правовых актов в области неразрушающего контроля и технического диагностирования выступил кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории неразрушающего контроля, технической диагностики и расчета остаточного ресурса ЗАО «Критерий» А.П. Ковалёнок. Его предложения по совершенствованию нормативных документов стали результатом работы, проделанной по поручению Госпромнадзора в рамках семинара, который прошел 27 сентября 2011 года.

С актуальным докладом по изменению законодательства в области обучения руководителей и специалистов выступила Е.В. Горбачёва – начальник научно-образовательного центра охраны труда и промышленной безопасности РИВШ. В своем выступлении Горбачёва Е.В. рассказала об изменениях в законодательстве по обучению и повышению квалификации руководителей и специалистов по промышленной безопасности и неразрушающему контролю в свете вступления в силу с 1 сентября 2011 года Кодекса Республики Беларусь об образовании и ряда новых нормативных правовых актов по повышению квалификации и переподготовке кадров.

С большим вниманием и интересом был заслушан доклад ведущего инженера Белорусского государственного центра аккредитации (БГЦА) Н.Б. Стаценко. В своем докладе Нина Борисовна уделила особое внимание вопросам аккредитации и периодического контроля лабо-

раторий неразрушающего контроля. Подробно разъяснила участникам семинара дополнительные требования к лабораториям, утвержденные технической комиссией БГЦА 12 сентября 2011 года. Она также привела примеры несоответствий, выявляемых при аккредитации и периодическом контроле лабораторий, примеры оформления документов системы менеджмента лабораторий: руководства по качеству, положения о лаборатории, технического паспорта и других документов в соответствии с требованиями технических нормативных правовых актов Республики Беларусь (ТНПА).

Начальник отдела «Орган по сертификации профессиональной компетентности персонала в области неразрушающего контроля» РИВШ Белая Е.Н. ознакомила участников семинара с новыми ТНПА в области промышленной безопасности и неразрушающего контроля, вышедшими в 2010–2011 годах, а также разъяснила изменения в области аккредитации органа по сертификации персонала РИВШ, которые были внесены в свете новых ТНПА.

Следует отметить, в работе семинара приняли активное участие как опытные специалисты с многолетним стажем, так и новые специалисты, которые решили посвятить свою деятельность неразрушающему контролю и технической диагностике.

Семинар прошёл в конструктивной, заинтересованной и дружеской обстановке. В ходе работы участники семинара могли обмениваться мнениями, обсудить актуальные проблемы и задачи неразрушающего контроля и технической диагностики. Докладчикам были вручены благодарности за активное участие в проведении семинара, а участникам – сертификаты об участии.

Участники семинара решили целесообразным проведение Научно-практического семинара «Актуальные вопросы проведения неразрушающего контроля объектов повышенной опасности» в 2012 году с расширением состава и привлечением более широкого круга специалистов, например, студентов старших курсов и аспирантов профильных вузов.

До новых встреч!

Статья поступила в редакцию 22.12.11

Магнитные тензометры

Измеритель натяжения троса ИНТМ-1



Предназначен для бесконтактного измерения натяжения стального ферромагнитного троса на основе анализа вторичной э.д.с. проходного преобразователя, через который проходит трос, по предварительно установленным калибровочным зависимостям

Технические характеристики:

Диапазон диаметров контролируемых тросов, мм:	1÷10.
Диапазон контролируемых нагрузок:	до предела прочности троса.
Относительная погрешность измерения, %	20.
Преобразователь :	проходной вихретоковый.
Питание:	автономное; сеть 220 В.
Габаритные размеры, мм:	
электронного блока	220 x 180 x 120;
наружный диаметр преобразователя	30.
Масса, кг:	
электронного блока	1,2;
преобразователя, не более	0,5.

Разработчик – Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
(тел. 284 23 50, факс 284 17 94,
e-mail: lab5@iaph.bas-net.by)

Тензомер магнитный ТМ-1



Предназначен для измерения деформации различных конструкций, в качестве тензочувствительного элемента применяется стальной трос (или проволока), закрепленный на этой конструкции, принцип действия основан на взаимосвязи магнитных параметров ферромагнетика с его деформацией

Технические характеристики:

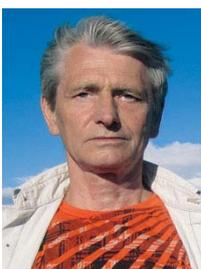
Коэффициент тензочувствительности:	до 50.
Питание:	автономное; сеть 220 В.
Габаритные размеры, мм:	
электронного блока	220 x 180 x 120;
наружный диаметр преобразователя	30.
Масса, кг:	
электронного блока	1,2.

Разработчик – Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
(тел. 284 23 50, факс 284 17 94,
e-mail: lab5@iaph.bas-net.by)



Белая Елена Николаевна

*ГУО «Республиканский институт высшей школы»
Начальник отдела «Орган по сертификации профессиональной компетентности персонала в области неразрушающего контроля»*



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@nipk.by*



Матюк Владимир Федорович

Matyuk V.F.

*доктор технических наук
ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»,
заведующий лабораторией
Тел. +(375 17) 284 18 55,
e-mail: matyuk@iaph.bas-net.by*



Михайлюк Игорь Алексеевич

*Кандидат физико-математических наук
ГУО «Республиканский институт высшей школы»,
проректор, руководитель органа по сертификации профессиональной компетентности персонала в области неразрушающего контроля*



Осипов Александр Александрович

A.A. Osipov

кандидат технических наук

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»,

ведущий научный сотрудник

Тел.: +(375 17) 284 24 17,

e-mail: osipov@iapf.bas-net.by



Павленко Павел Николаевич

Pavlenko P.N.

старший преподаватель факультета охраны труда и промыш-

ленной безопасности МИПК и ПК БНТУ, старший инженер лабо-

ратории неразрушающего контроля МИПК и ПК БНТУ

220014 г. Минск, ул. Минина, 23, корп. 2

Тел.: 8-017-310-42-81,

8-029-3499541 (velcom)



Федоров Владислав Викторович

Республиканское унитарное предприятие

«Белорусский государственный институт метрологии»,

ведущий инженер производственно-исследовательского отдела

радиоэлектронных измерений

E-mail: pozdeeva@belgim.by

**Правила для авторов
научно-практического журнала
«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 «Диатех», редакция журнала «Неразрушающий контроль и диагностика».**

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

Измерение магнитных характеристик магнитомягких материалов при квазистатическом перемагничивании <i>Матюк В.Ф., Осипов А.А.</i>	3
Неразрушающий контроль в промышленности. Акустический контроль <i>Горбаш В.Г., Делендик М.Н., Павленко П.Н.</i>	35
13-е заседание Рабочей группы по неразрушающему контролю научно-технической комиссии по метрологии МГС <i>Федоров В.В.</i>	52
Научно-практический семинар «Актуальные вопросы проведения неразрушающего контроля объектов повышенной опасности» <i>Белая Е.Н., Михайлюк И.А.</i>	54
Магнитные тензометры	58
Авторский указатель	60
Правила для авторов	62

**13-е заседание Рабочей группы
по неразрушающему контролю научно-технической
комиссии по метрологии МГС
(Стр. 52 - 53)**

