

І СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ. ОПІР РУЙНУВАННЮ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

УДК 620.179.14

Д-р физ.-мат. наук З. Т. Назарчук, канд. техн. наук В. Г. Рыбачук,
канд. техн. наук В. Н. Учанин

Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины, г. Львов

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СТРУКТУРОСКОПИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрены основные направления электромагнитной структуроскопии конструкционных материалов. Показано, что контроль структурно-механических свойств неферромагнитных материалов целесообразно осуществлять с использованием вихретоковых измерителей удельной электрической проводимости (УЭП). Представлены примеры корреляционных связей между УЭП, механическими свойствами и показателями термообработки для ряда алюминиевых и титановых сплавов. Рассмотрены принципы построения вихретоковых измерителей УЭП, проведена их классификация. Приведены технические характеристики некоторых современных приборов этого типа. Показано, что для структуроскопии ферромагнитных материалов наиболее целесообразно использовать метод коэрцитиметрии. Дана классификация методов измерения коэрцитивной силы и рассмотрены области применения коэрцитиметров в неразрушающем контроле. Представлены результаты разработки коэрцитиметра ВКС-968, предназначенного для контроля высококоэрцитивных изделий из спеченных твердых сплавов, а также изделий из металло-алмазных композиционных материалов.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, структуроскопия, вихретоковый преобразователь, удельная электрическая проводимость, коэрцитивная сила, коэрцитиметр.

Введение

В существующем многообразии задач, решаемых методами неразрушающего контроля (НК), важная роль отводится структуроскопии. В отличие от дефектоскопии, которая связана с выявлением и оценкой параметров уже существующих дефектов в материалах и изделиях, структуроскопия занимается оценкой структурных и физико-механических характеристик материалов и выявлением таких их изменений, которые предшествуют возникновению дефектов, т. е. позволяет прогнозировать преддефектные состояния.

Из всех физических полей, используемых в неразрушающем контроле, при решении задач структуроскопии обычно применяются акустические и электромагнитные поля [1–5]. Акустическую структуроскопию осуществляют зондированием материалов различными типами упругих волн и измерением параметров последних. Поэтому ей присущи все достоинства и недостатки акустических методов неразрушающего контроля. Основным достоинством является возможность контроля структуры очень широкой номенклатуры конструкционных материалов, в которых могут распространяться упругие колебания (чер-

ные и цветные металлы и их сплавы, полимеры, пластмассы, композиционные материалы и т.п.). Главными недостатками являются необходимость создания акустического контакта с поверхностью материала, а также наличие «мертвой» зоны, которая делает невозможным контроль структуры приповерхностных слоев материала. Второй из отмеченных недостатков является особенно существенным, так как именно в приповерхностном слое обычно происходит зарождение всевозможных дефектов. Указанных недостатков лишены методы электромагнитной структуроскопии, которые позволяют проводить оценку структурных и механических характеристик конструкционных материалов путем измерения их электрических или магнитных параметров. Обязательным условием для применения электромагнитной структуроскопии является наличие у контролируемого материала электропроводных или магнитных свойств. Вследствие затухания переменных электромагнитных полей в средах, обладающих электропроводными и магнитными свойствами, электромагнитная структуроскопия позволяет контролировать свойства только поверхностных слоев материала. При использовании традиционного

для неразрушающего контроля диапазона частот (как правило, до 10 МГц) толщина поверхностного слоя, в который проникает зондирующее поле, составляет 1...2 мм, что обусловлено влиянием скин-эффекта. Т. е. акустические и электромагнитные методы структуроскопии взаимно дополняют друг друга.

Современная электромагнитная структуроскопия конструкционных материалов представлена двумя основными направлениями:

1) вихретоковой структуроскопией, которая предназначена для оценки структурных и механических характеристик неферромагнитных металлов и сплавов путем измерения удельной электрической проводимости (УЭП);

2) магнитной структуроскопией ферромагнитных материалов на основе измерения коэрцитивной силы.

В данной работе представлены основные результаты исследований и разработок по этим двум направлениям.

Технические средства вихретоковой структуроскопии неферромагнитных материалов

В основе вихретоковой структуроскопии неферромагнитных материалов лежит возможность бесконтактного измерения их УЭП, которая является структурно-чувствительным параметром. С помощью вихретоковой структуроскопии неферромагнитных материалов решают следующие проблемы, связанные со структурой поверхностных слоев: сортировка материалов и сплавов по маркам, оценка их химической чистоты, выявление неоднородных по структуре зон, оценка глубины и упрочненных слоев после химико-термической и поверхностной обработок, контроль правильности выполнения термической и механической обработок, определение влияния повторного нагрева на прочностные свойства термоупрочненных сплавов, выявление мест коррозионных повреждений, оценка внутренних напряжений [6–9].

На рис. 1 приведен типичный вид зависимости сигнала параметрического вихретокового преобразователя (ВТП) в комплексной плоскости (годограф) от изменений УЭП, рабочей частоты и зазора между ВТП и поверхностью объекта контроля. Положение рабочей точки (P_1 , P_2 , P_3) на ней определяется обобщенным параметром $\beta = R\sqrt{\omega\sigma\mu_0}$, где R – радиус обмотки возбуждения; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота тока возбуждения; f – рабочая частота; σ – УЭП материала объекта контроля; $\mu = \mu_0$ – магнитная проницаемость неферромагнитного материала. Анализ годографов ВТП показывает, что максимальная чувствительность к УЭП наблюдается при таких значениях β , когда внешние значения действительной составляющей импеданса являются максимальными (на рис. 1 это соответствует области в окрестности точки P_2).

С увеличением рабочей частоты чувствительность к изменениям УЭП уменьшается, а чувствительность

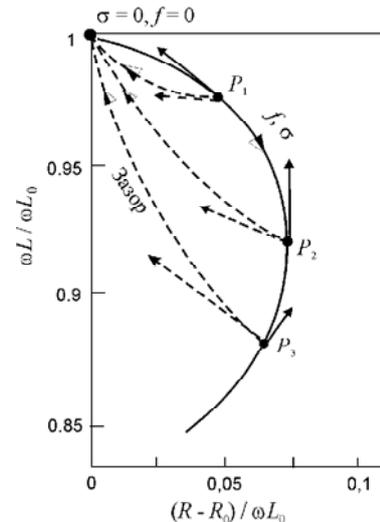


Рис. 1. Типичная зависимость импеданса ВТП от удельной электропроводности σ , зазора и рабочей частоты f

к зазору увеличивается. Это иллюстрируется размерами стрелок, которые определяют направление увеличения зазора (пунктирные стрелки) и уменьшения УЭП (сплошные стрелки) соответственно в рабочих точках P_1 и P_2 . Главной проблемой, которую приходится решать при вихретоковых измерениях УЭП, является отстройка от влияния зазора. Поэтому выбор рабочей точки на годографе сигнала ВТП определяется, в основном, исходя из данного соображения. Для уменьшения влияния зазора можно использовать некоторые особенности, которые имеют место с увеличением рабочей частоты. В частности видно, что в экстремальной рабочей точке (например, точке P_3) изменения действительной составляющей импеданса от зазора и уменьшения УЭП имеют разный знак. Такое различие позволяет при включении ВТП в резонансный контур выбором режима работы последнего полностью отстроиться от влияния колебаний зазора. Благодаря большой разности фазового угла для разных значений УЭП имеется возможность отстройки от изменений сигнала трансформаторных ВТП. При этом для расширения диапазона отстройки вводят дополнительный компенсирующий сигнал, который суммируют с сигналом ВТП [10, 11].

Особенности внутреннего строения вихретоковых измерителей УЭП в значительной мере определяются типом ВТП и используемым информативным параметром его выходного сигнала. Поэтому при сравнении различных измерителей УЭП следует руководствоваться именно этими признаками. Классификация вихретоковых измерителей УЭП представалена на рис. 2. По способу получения первичной информации они разделяются на приборы с параметрическими ВТП и приборы с трансформаторными ВТП. Основным недостатком измерителей УЭП с параметрическими ВТП является высокая температурная и временная нестабильность, а следовательно, большие погрешности

измерения. Поэтому сегодня они почти полностью вытеснены приборами с трансформаторными ВТП.

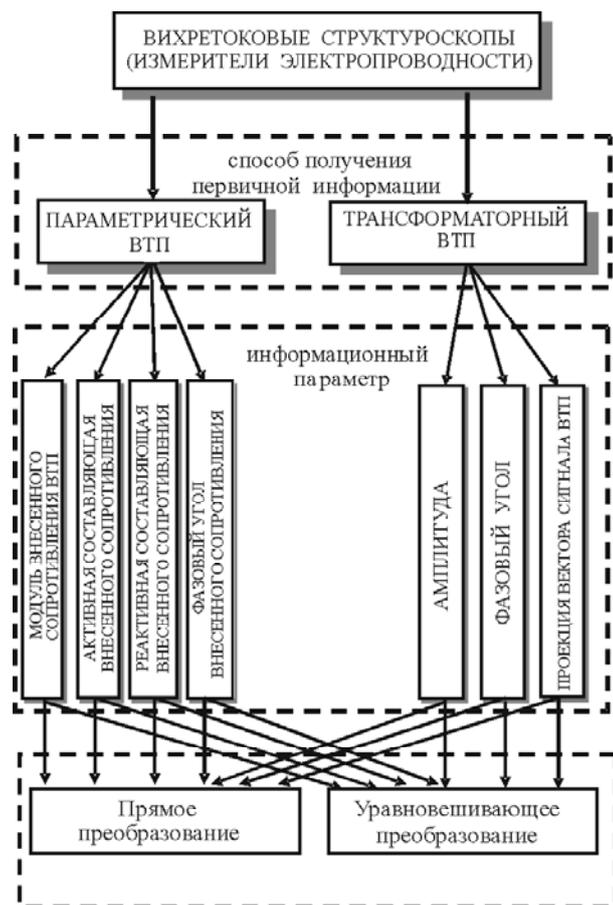


Рис. 2. Классификация вихрековых структуроскопов (измерителей электропроводности)

Измерители УЭП с трансформаторными ВТП в зависимости от информативного параметра, на который реагирует их измерительная схема, делятся на амплитудные, фазовые и амплитудно-фазовые. Информативным параметром в них соответственно является амплитуда внесенного напряжения, ее фаза или фаза напряжения, которое представляет собой векторную сумму внесенного и некоторого вспомогательного напряжения, и проекция вектора внесенного напряжения на направление вектора опорного напряжения [6–11]. В последнем случае фазу опорного напряжения выбирают, исходя из условия ослабления влияния зазора [10, 11]. Вариантом амплитудно-фазовых приборов являются измерители, в которых УЭП определяют путем измерения активной и реактивной составляющих внесенного напряжения или одной из них. По типу структурной схемы вихрековые измерители УЭП делятся на две группы: прямого и уравновешивающего преобразования.

Наиболее распространенными являются фазовые измерители УЭП, преимуществом которых является высокая степень отстройки от колебаний зазора между ВТП и поверхностью контролируемого материала

[10, 11]. К фазовым измерителям УЭП прямого преобразования относятся приборы типа ОПИР (ИЭ 10-60, ИЭ 10-35, ИЭ 0,3-3, ИЭ-У, ИЭ-УП, ОПИР-1, ОПИР-2, ОПИР-3, ОПИР-4) [4, 8–11], разработанные в ФМИ им. Г. В. Карпенко НАН Украины. Их погрешности в зависимости от влияния внешних факторов составляют 2...5 % от измеряемого значения УЭП. В сравнении с амплитудными фазовые измерители обеспечивают лучшую отстройку от влияния зазора и при одинаковой погрешности измерения позволяют использовать ВТП малых размеров с высокой локальностью измерений. Измеритель электропроводности ОПИР-2 осуществляет контроль на рабочей частоте 85 кГц и предназначен для бесконтактного измерения УЭП алюминиевых сплавов в диапазоне от 17 до 38 МСм/м. Измеритель ОПИР-3 имеет рабочую частоту 2 МГц и предназначен для бесконтактного измерения УЭП титановых сплавов и аустенитных сталей в диапазоне от 0,3 до 3 МСм/м. Измеритель ОПИР-4 работает на частоте 5 МГц и обеспечивает контроль качества углекомпозиционных материалов и графитов. Портативный цифровой фазовый измеритель электропроводности типа ВЭ-17НЦ обеспечивает определение УЭП алюминиевых сплавов с погрешностью 2 %. Он имеет высокую локальность контроля, так как обмотки ВТП намотаны на ферритовом сердечнике диаметром 1,2 мм. Этот прибор имеет малые габариты и автономное питание, что особенно важно для применения в авиационной промышленности.

Для контроля изменений структуры алюминиевых сплавов в ФМИ им. Г. В. Карпенко НАНУ разработан цифровой вихрековый структуроскоп (измеритель электропроводности) типа ВЕП-21 (рис. 3), в основу которого положен фазовый способ измерения УЭП [10, 11]. Данный прибор измеряет УЭП в диапазоне от 14 до 35 МСм/м, который перекрывает диапазон УЭП для основных конструкционных алюминиевых сплавов. Основная погрешность измерителя ВЕП-21 в нормальных условиях не превышает 2 % от измеряемой величины, допустимый зазор между ВТП и поверхностью контролируемого объекта до 0,2 мм, рабочая частота контроля 80 кГц. В приборе реализована оригинальная схема линеаризации информационного сигнала, которая позволила обеспечить непосредственный отсчет в единицах удельной электропроводности [12]. Благодаря высоким метрологическим и эксплуатационным характеристикам, структуроскоп ВЕП-21 хорошо подходит для исследования слабых структурных изменений алюминиевых сплавов, например их деградации [5, 13].

Связь между удельной электрической проводимостью и структурно-механическими свойствами неферромагнитных материалов

Основной объем конструкционных материалов, контролируемых вихрековыми структуроскопами, составляют алюминиевые и титановые сплавы, кото-



Рис. 3. Вихретоковий структуроскоп ВЕП-21

рые широко используются в авиационной технике. Ниже в качестве примера представим результаты исследований по установлению корреляционных связей между УЭП и структурно-механическими свойствами этих материалов [4–8].

Механические свойства алюминиевых сплавов изменяются в зависимости от режимов термической обработки, в частности температуры и длительности нагрева при искусственном старении. Так, для сплава В93 установлена однозначная зависимость его УЭП от температуры старения и времени выдержки, где она увеличивается с ростом этих величин (рис. 4).

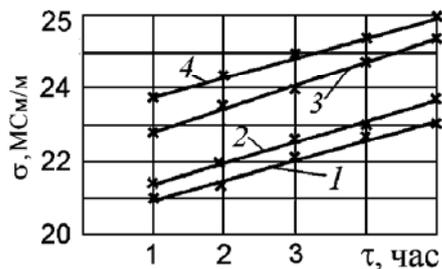


Рис. 4. Зависимость УЭП сплава В93 от длительности нагрева при искусственном старении при различных температурах:

1 – 165 °С; 2 – 170 °С; 3 – 175 °С; 4 – 180 °С

Изменение температуры закалки для сплава В93 от 400 до 490 °С приводит к изменению УЭП на 2 МСм/м (рис. 5).

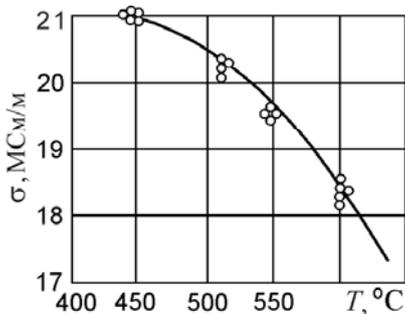


Рис. 5. Зависимость УЭП сплава В93 от температуры закалки

Вихретоковый метод структуроскопии можно применять для оценки качества термообработки на различных этапах ее проведения:

- определение вида полуфабриката и его марки при поставке;
- определение правильности режимов обработки деталей в печи;
- определение момента времени для переноса деталей из печи в ванну для закалки;
- контроль правильности выдержки режимов закалки;
- контроль выдержки режимов старения материала.

Для некоторых алюминиевых сплавов, например АК6, Д1, Д16, качество термообработки оценивают по их твердости и прочности, которые также коррелируют с УЭП. Причем разброс значений УЭП в 1,5–2 раза меньше разброса значений твердости при многократных измерениях [8]. Особенно четко корреляция между УЭП и прочностью прослеживается для свежезакаленных и состаренных сплавов типа Д16 (рис. 6).

Таким образом, на основе измерения УЭП можно контролировать изменения структуры и оценивать соответствующее разупрочнение алюминиевых сплавов при повторных нагревах. Причем, как это видно из зависимостей, показанных на рис. 7, УЭП алюминиевых сплавов чувствительна также к времени выдержки при повышенной температуре.

Помимо алюминиевых сплавов вихретоковые измерители можно применять и для контроля структуры титановых сплавов, которые широко применяются в различных узлах и агрегатах авиационной техники. УЭП известных титановых сплавов изменяется в диапазоне от 0,44 до 2,4 МСм/м. Столь значительное (более чем в 5 раз) изменение данного параметра обеспечивает хорошие возможности для сортировки и разбраковки титановых сплавов различных марок.

Термообработка титановых сплавов, которая предусматривает такие технологические операции как отжиг, закалка и старение, также влияет на их УЭП. На рис. 8 показаны зависимости УЭП ряда титановых сплавов от температуры нагрева [6]. Из них видно, что при нагреве до 400 °С УЭП сплава ВТ1-1 изменяется на 1,2 МСм/м, а сплава ВТ6С – менее чем на 0,2 МСм/м. Для регистрации столь небольших изменений УЭП необходимо использовать измерители электропроводности с высокой чувствительностью и стабильностью в работе.

По результатам измерения, УЭП можно также контролировать толщину лакировочного слоя чистого титана на некоторых титановых сплавах (например, ВТ-14, ВТ-15, ВТ-16). При изменении его толщины от 0 до 800 мкм эффективная УЭП этих сплавов изменяется от 0,5...0,9 до 2,3 МСм/м [6].

Одним из актуальных направлений в вихретоковой структуроскопии является контроль поверхностного слоя немагнитных материалов (толщиной несколько десятков мкм). Необходимость в этом возникает, на-

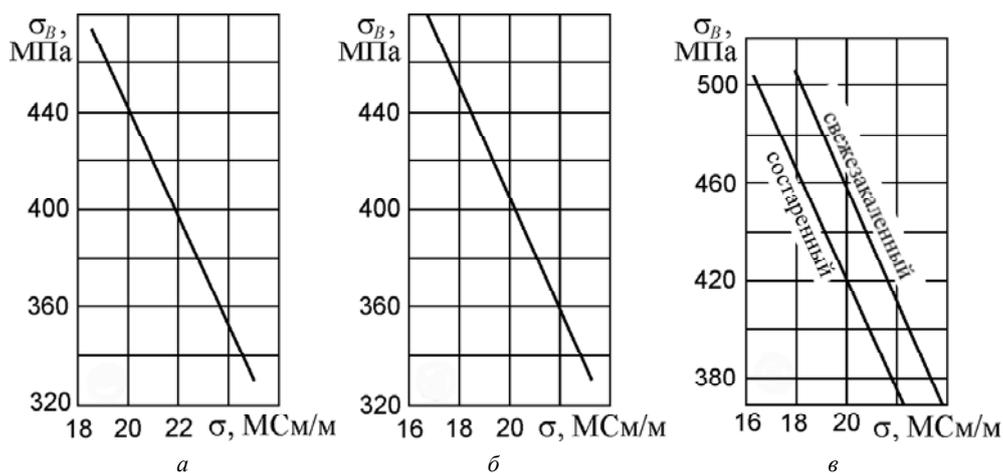


Рис. 6. Корреляция между УЭП листового сплава Д16 его прочностью:

a – в свежезакаленном состоянии (толщина листа 2,5 мм); *б* – в состаренном состоянии (толщина листа 2,5 мм); *в* – для листов большой толщины

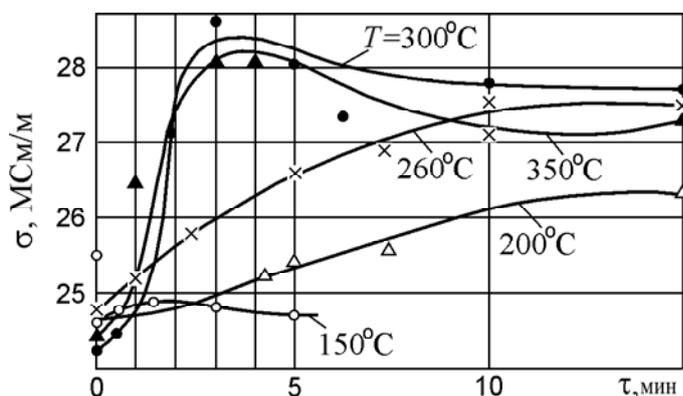


Рис. 7. Зависимость УЭП сплава В93 от температуры и времени выдержки при повторном нагреве

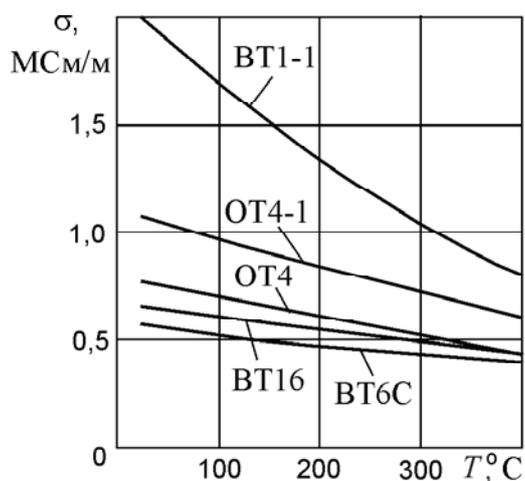


Рис. 8. Изменения УЭП некоторых титановых сплавов при их нагреве

пример, при контроле газонасыщенных слоев в титановых сплавах, алитированных слоев на поверхности изделий из жаропрочных сталей, исследовании начальных стадий межкристаллитных повреждений и т.п. Проблема структуроскопии поверхностных слоев состоит в том, что стандартные структуроскопы-измерители УЭП имеют сравнительно невысокие рабочие частоты (до 10 МГц, а чаще всего это десятки – сотни кГц), и поэтому информативные изменения УЭП поверхностного слоя практически полностью сглаживаются электропроводностью глубинных слоев материала. Для повышения селективности контроля к изменениям УЭП в тонком поверхностном слое необходимо локализовать вихревые токи в этом слое путем значительного увеличения рабочих частот. Задачи такого характера позволяют решать разработанные в ФМИ им. Г.В. Карпенко НАН Украины высокочастотные вихретоковые структуроскопы «Альфа», «Дельта», «Сигма» и ВС-11ВЧ («Альфа М») [14].

Структуроскопия ферромагнитных материалов методами коэрцитиметрии

Основным фактором, определяющим методы неразрушающего контроля структуры ферромагнитных материалов, является наличие у них магнитных свойств. Поэтому их структуроскопия основывается на измерении одного из магнитных параметров материала. В связи с этим принято говорить о магнитной структуроскопии материалов. В зависимости от того, какой магнитный параметр материала используется в качестве информативного, различают следующие виды магнитной структуроскопии: коэрцитиметрию (контроль посредством измерения коэрцитивной силы материала), контроль по магнитной проницаемости, контроль по остаточной намагниченности, магнитошумовой контроль (контроль по методу шумов Баркгаузена), метод высших гармоник и др. На практике наиболее широкое распространение получила коэрцитиметрия. Это объясняется тем, что, с одной стороны, коэрцитивная сила является в достаточной степени структурно-чувствительным параметром материала, а с другой – отработанностью методики ее измерения.

Коэрцитивная сила – одна из основных статических магнитных характеристик ферромагнетиков. Существует несколько определений коэрцитивной силы. В неразрушающем контроле коэрцитивную силу принято определять по намагниченности H_{cJ} или по индукции H_{cb} . Численно она равна напряженности размагничивающего поля, которое необходимо приложить к контролируемому изделию, предварительно намагниченному до состояния технического насыщения, для изменения его намагниченности (магнитной индукции) от значения остаточной намагниченности (магнитной индукции) до нуля. Для большинства используемых в технике материалов разницей между значениями H_{cJ} и H_{cb} можно пренебречь, хотя для некоторых магнитотвердых материалов, например применяемых для изготовления постоянных магнитов, эти значения существенно отличаются [15].

Различают измерения коэрцитивной силы в замкнутой, частично замкнутой и разомкнутой (открытой) магнитных цепях. Выбор типа магнитной цепи в значительной мере зависит от особенностей изделий, подлежащих контролю. Так, для контроля изделий, форма которых позволяет просто реализовать контакт их поверхности с сердечником электромагнита, широко используются коэрцитиметры с приставными П-образными электромагнитами. Они измеряют коэрцитивную силу локального участка изделия, через которую замыкается магнитный поток электромагнита. Если контролю подлежат изделия малых размеров и неправильной формы, то осуществляют интегральные измерения коэрцитивной силы изделия в целом в разомкнутой магнитной цепи. Классификация методов измерения коэрцитивной силы приведена на рис. 9.

Значение коэрцитивной силы зависит от химического состава, структуры материала и является одним

из основных показателей качества его термической (химико-термической) обработки. Методы коэрцитиметрии применяются для контроля структуры широкой номенклатуры ферромагнитных материалов: стали, чугуны, спеченные твердые сплавы, литые постоянные магниты и некоторые другие. Традиционно для неразрушающего контроля изделий из сталей и чугунов применяют коэрцитиметрические структуроскопы с приставными П-образными электромагнитами. С их помощью осуществляют сортировку чугунов и сталей по маркам, контролируют твердость, прочность, определяют толщину закаленного или цементированного слоя, качество термической и химико-термической обработки [3, 7]. Новым направлением применения данных приборов, которое активно развивается в последние годы, является оценка усталостного состояния и остаточного ресурса металлоконструкций [16]. Важными объектами коэрцитиметрического неразрушающего контроля являются изделия из спеченных твердых сплавов. Их получают путем спекания порошковых смесей, важнейшими компонентами которых являются кобальт и вольфрам. При фиксированном составе кобальтовой фазы коэрцитивная сила твердых сплавов определяется объемным содержанием кобальта и размером зерна карбида вольфрама. На ее значение влияют также химический состав исходной смеси, технология получения и условия спекания. Поэтому производство твердосплавных изделий осуществляют таким образом, чтобы получать образцы с одинаковым значением коэрцитивной силы, что гарантирует получение идентичных структурно-механических характеристик [17].

Коэрцитивная сила твердых сплавов также зависит от режимов термообработки. Термообработку применяют для улучшения механических свойств твердых сплавов, например для упрочнения путем закалки. У закаленных с высокой скоростью охлаждения сплавов наблюдается значительный рост коэрцитивной силы, который может достигать 10...14 % от ее значения для твердого сплава в исходном состоянии [18].

Особенность твердосплавных изделий состоит в их относительно малых размерах (десятки миллиметров), разнообразии форм (часто неправильной конфигурации), а также больших значениях коэрцитивной силы (единицы – десятки кА/м). Отсюда вытекают следующие особенности измерения их коэрцитивной силы. Во-первых, измеряются интегральные значения коэрцитивной силы твердосплавных изделий в целом. Осуществить локальные измерения невозможно из-за сложности реализации локального намагничивания до состояния технического насыщения и последующего размагничивания отдельных участков таких изделий. Во-вторых, намагничивание и размагничивание твердосплавных изделий осуществляют в разомкнутой магнитной цепи из-за технической сложности, а часто и невозможности создания замкнутой магнитной цепи вследствие наличия у таких изделий сложных форм и

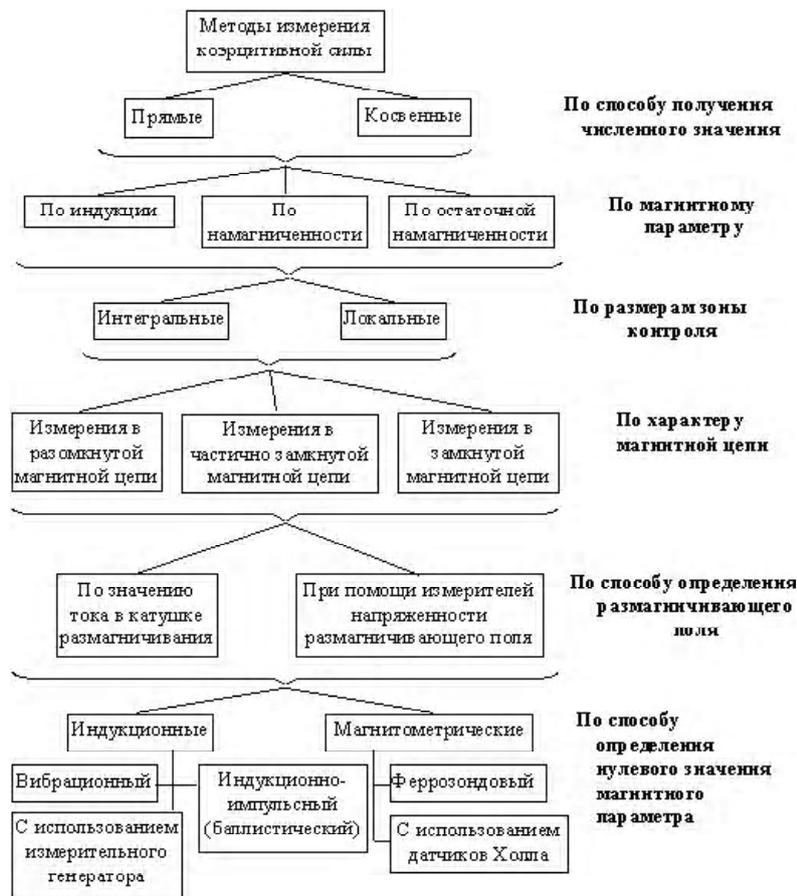


Рис. 9. Классификация методов измерения коэрцитивной силы

криволинейных поверхностей. В-третьих, при коэрцитиметрическом неразрушающем контроле твердосплавной продукции измеряют коэрцитивную силу по намагниченности, поскольку результаты ее измерения в замкнутой и разомкнутой магнитных цепях совпадают. Результат измерения при этом можно получить по значению постоянной катушки размагничивания и току в ней в момент достижения контролируемым изделием состояния нулевой намагниченности [15]. Благодаря этому нет необходимости в использовании измерителей напряженности размагничивающего поля и можно достаточно просто автоматизировать процесс измерений.

Для структуроскопии изделий из спеченных твердых сплавов в ФМИ им. Г. В. Карпенко НАН Украины разработан коэрцитиметр ВКС-968 (рис. 10), который позволяет измерять интегральное значение коэрцитивной силы в автоматическом режиме [19]. Прибор выполнен в переносном варианте и конструктивно состоит из двух блоков – блока магнитных измерений (БМИ) и блока электронных преобразований (БЭП). Блоки соединены между собой сигнальным кабелем и кабелем питания БЭП. В состав блока магнитных измерений входят катушки намагничивания и размагничивания, феррозонд-градиентометр, который выполняет роль датчика полярности намагниченности объекта контроля, силовых элементов узла намагничивания,

транспортирующее устройство для подачи объекта контроля на позицию измерения и некоторые вспомогательные узлы. Блок электронных преобразований состоит из следующих функциональных элементов: узлов намагничивания, размагничивания, определения полярности намагниченности, генератора возбуждения феррозонда и магнитного модулятора, программного устройства, аналого-цифрового преобразователя и отсчетного устройства. Прибор работает следующим образом. Контролируемое изделие размещают на платформе транспортирующего устройства и подают на позицию измерений. Оператор, нажимая кнопку «ПУСК», запускает программное устройство, по команде которого включается узел намагничивания, и через катушку намагничивания проходят импульсы выпрямленного тока от трехфазной электрической сети 220 В, 50 Гц. В зоне размещения контролируемого изделия возникает достаточное для его технического насыщения импульсное магнитное поле. Полярность намагниченности изделия определяют путем сравнения по фазе выходного сигнала феррозонда и сигнала генератора возбуждения. При воздействии на сердечники феррозонда постоянного внешнего магнитного поля, создаваемого изделием, в спектре выходного сигнала появляются четные гармоники. В качестве информационного используется сигнал второй гармоники,

фаза которой относительно сигнала генератора возбуждения определяется полярностью намагниченности контролируемого изделия. Полученную таким образом информацию в виде постоянного напряжения той или иной полярности используют для управления процессом размагничивания.



Рис. 10. Коэрцитиметр ВКС-968

Размагничивание осуществляется созданием плавно нарастающего по величине магнитного поля, противоположного по отношению к намагничивающему полю направления. Рост размагничивающего поля продолжается до момента, пока намагниченность контролируемого изделия не станет равной нулю. Признаком этого является исчезновение второй гармоники в сигнале феррозонда. На этом процесс размагничивания завершается, а значение напряженности размагничивающего поля фиксируется и отображается отсчетным устройством в виде результата измерения.

Коэрцитиметр ВКС-968 имеет такие основные технические характеристики: диапазон измерения коэрцитивной силы от 2,0 до 40 кА/м; дискретность отсчета 0,1 кА/м; относительная приведенная погрешность измерения, включающая систематическую и случайную составляющие, не превышает 4 %; погрешность определения напряженности размагничивающего поля – 1 %; максимальные размеры объекта контроля – 50×30 ×20мм или Ø 35 мм, высота – 16 мм.

Новым направлением применения данного прибора является неразрушающий контроль механических свойств металлоалмазных композиционных материалов. Установлено, что их коэрцитивная сила зависит линейно от твердости и границы текучести. Это позволяет заменить выборочные механические испытания изделий из таких материалов (например, алмазные сегменты кругов для резки) 100 % неразрушающим контролем по результатам измерения коэрцитивной силы [17].

Выводы

Основным информативным параметром о структуре неферромагнитных конструкционных материалов, который успешно применяется при их вихретоковом контроле, является удельная электрическая проводимость (УЭП). Между УЭП алюминиевых сплавов и их структурно-механическими существуют устойчивые корреляционные связи. Аналогичные связи характер-

ны и для титановых сплавов, однако абсолютные изменения их УЭП значительно меньше. Для проведения структуроскопии алюминиевых и титановых сплавов лучше всего подходят фазовые вихретоковые измерители УЭП, обеспечивающие высокую локальность контроля и хорошее подавление колебаний зазора между торцом вихретокового преобразователя и поверхностью контролируемого изделия. К таким приборам относятся измерители УЭП семейств ОПИР, а также структуроскоп ВЕП-21.

Для структуроскопии изделий из ферромагнитных материалов наиболее целесообразно использовать метод измерения коэрцитивной силы. Коэрцитивная сила является структурочувствительным параметром для широкой номенклатуры ферромагнитных конструкционных материалов (стали, чугуны, спеченные твердые сплавы, постоянные магниты, металлоалмазные композиты и др.). Для контроля структуры высококоэрцитивных твердых сплавов, а также металлоалмазных композитов разработан коэрцитиметр ВКС-968, который позволяет измерять интегральные значения коэрцитивной силы по намагниченности изделий произвольной формы.

Перечень ссылок

1. Назарчук З. Т. Розвиток досліджень з неруйнівного контролю та технічної діагностики у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України / [Назарчук З. Т., Учанін В. М., Рибачук В. Г.] / Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. – Львів: Фізико-механічний ін-т ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2005. – Вип. 10: Акустичні та електромагнітні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів. – С. 3–11.
2. Неразрушающий контроль: В 5 кн. / [Ермолов И. Н., Алешин Н. П., Потапов А. И., Сухоруков В. В.]; под ред. В. В. Сухорукова – М.: Высш. шк., 1991. – Кн. 2: Акустические методы контроля: практ. пособие. – 283 с.
3. Неразрушающий контроль: В 5 кн. / [Герасимов В. Г., Покровский А. Д., Сухоруков В. В.]; под ред. В. В. Сухорукова – М.: Высш. шк., 1992. – Кн. 3: Электромагнитный контроль: практ. пособие. – 312 с.
4. Механіка руйнування і міцність матеріалів. Довідн. посібник. Т. 5: Неруйнівний контроль та технічна діагностика [Назарчук З. Т., Кошовий В. В., Скальський В. Р. та ін.]; під ред. З. Т. Назарчука. – Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2001. – 1134 с.
5. Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довідн. посібник / [Осташ О. П., Федірко В. М., Учанін В. М. та ін.]; під заг. ред. Панасюка В. В.]. – Львів: Сполом, 2007. – Т. 9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій. – 1068 с.
6. Неразрушающий контроль: справ-к в 7 т. Кн. 2: Вихретоковый контроль / [Ю.К. Федосенко, В. Г. Герасимов, А. Д. Покровский, Ю. Я. Останин]; под общ. ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с. – С. 340–687.
7. Дорофеев А. Л. Физические основы электромагнитной структуроскопии / А. Л. Дорофеев, Р. Е. Ершов; отв. ред. Р. Г. Хлебопрос. – Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1985. – 182 с.

8. Наумов Н. М. Резистометрический неразрушающий контроль алюминиевых деформируемых сплавов / Н. М. Наумов, П. Г. Микляев – М. : Металлургия, 1974. – 200 с.
9. Цирг В. Н. Применение вихретоковых измерителей электропроводности для анализа механических свойств алюминиевых сплавов / В. Н. Цирг, В. Н. Учанин, Г. Н. Макаров // Совершенствование технологических процессов ремонта авиационной техники на заводах ГА. – М. : ВГПО «Авиаремонт», 1984. – С. 39–40.
10. Косовский Д. И. Подавление влияния зазора при вихретоковом измерении удельной проводимости / Д. И. Косовский, А. И. Никитин, Ю. И. Шкарлет // Дефектоскопия. – 1982. – 9. – 56 – 62.
11. Учанин В. Н. Подавление влияния зазора при бесконтактном измерении удельной электрической проводимости методом вихревых токов / В. Н. Учанин, Г. Н. Макаров // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1996. – № 4. – С. 41–45.
12. Заявка на винахід. Вихрострумовий вимірювач питомої електропровідності неферомагнітних матеріалів / Учанин В. М., Макаров Г. М., Черленевский В. В. (Україна) ; заявник Фізико-механічний ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України. – № а2010 08373 ; заявл. 05.07.2010.
13. Оцінка деградації алюмінієвих сплавів методом вихрострумової структуроскопії / [О. П. Осташ, І. М. Андрейко, В. М. Учанин, Ю. В. Головатюк] // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. – Вип. 11 : Електромагнітний, акустичний та оптичний неруйнівний контроль матеріалів та виробів. – Львів : ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України. – 2006. – С. 138–142.
14. Uchanin V. Elevated Frequencies in Eddy Currents – New Possibilities of Thin Surface Layer Evaluation / V. Uchanin // 15th World Conference on Nondestructive Testing, 15–21 October 2000: Proc. – Rome, 2000. – 651 p.
15. Февралева Н. Е. Магнитотвердые материалы и постоянные магниты. Определение характеристик. Справ-к / Н. Е. Февралева – К. : Наукова думка, 1969. – 232 с.
16. Безлюдько Г. Я. Эксплуатационный контроль усталостного состояния и ресурса металлопродукции неразрушающим магнитным (коэрцитиметрическим) методом / Г. Я. Безлюдько // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2003. – № 2. – С. 20–26.
17. Лошак М. Г. Использование коэрцитиметров для контроля производства твердых сплавов и металлоалмазных композиций / М. Г. Лошак, Л. И. Александрова // Вестник СевГТУ. Механика, энергетика, экология. – Севастополь : Изд-во СевГТУ. – 2000. – Вып. 25. – С. 116–123.
18. Лошак М.Г. Прочность и долговечность твердых сплавов / М.Г. Лошак. – К. : Наук. думка, 1984. – 328 с.
19. Назарчук З. Т. Прилад для вимірювання інтегрального значення коерцитивної сили / З. Т. Назарчук, В. Г. Рибачук, Б. С. Філюшин // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. – Вип. 11: Електромагнітний, ультразвуковий та оптичний контроль матеріалів – Львів : ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України. – 2006. – С. 103–110.

Одержано 03.11.2010

Назарчук З.Т., Рибачук В.Г., Учанин В.М. Електромагнітна структуроскопія конструкційних матеріалів

Розглянуто основні напрямки електромагнітної структуроскопії конструкційних матеріалів. Показано, що контроль структурно-механічних властивостей неферомагнітних матеріалів доцільно здійснювати за застосуванням вихрострумових вимірювачів питомої електричної провідності (ПЕП). Представлено приклади кореляційних зв'язків між ПЕП, механічними властивостями та показниками термообробки для деяких алюмінієвих і титанових сплавів. Розглянуто принципи побудови вихрострумових вимірювачів ПЕП, здійснено їх класифікацію. Наведено технічні характеристики деяких сучасних приладів цього типу. Показано, що для структуроскопії феромагнітних матеріалів найбільш доцільно застосовувати метод коерцитиметрії. Зроблено класифікацію методів вимірювання коерцитивної сили та розглянуто сфери застосування коерцитиметрів у неруйнівному контролі. Представлено результати розроблення коерцитиметра ВКС-968, призначеного для контролю висококоерцитивних виробів зі спечених твердих сплавів, а також виробів з металоалмазних композиційних матеріалів.

Ключові слова: неруйнівний контроль, структуроскопія, вихрострумовий перетворювач, питома електрична провідність, коерцитивна сила, коерцитиметр.

Nazarchuk Z., Rybachuk V., Uchanin V. Structural materials electromagnetic structure investigation

The main directions of structural materials electromagnetic structure investigation are considered. The worthy for testing of the structural and mechanical properties of non-ferromagnetic materials by using of eddy current specific electrical conductivity (SEC) meters is shown. Examples of correlations between SEC, mechanical properties and thermal treatment parameters for some aluminum and titanium alloys are presented. The principles of eddy current SEC meters construction are considered, their classification is carried out. The technical characteristics of this type modern devices are represented. It is shown, that for structure investigation of ferromagnetic materials the method of coercive force measuring is most appropriate for use. The classification of coercive force measuring methods is made. The application of coercimeters for nondestructive testing is considered. The results of ВКС-968 type coercimeter engineering development are presented. This device is designed for testing of high coercive force value products from sintered hard alloys, as well as products from metall-diamond composite materials.

Key words: non-destructive testing, structure investigation, eddy current probe, electrical conductivity, coercive force, coercimeter.