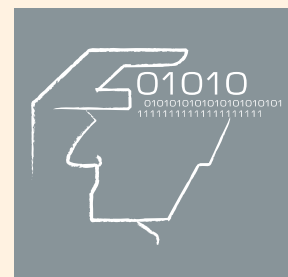


Quantitative Estimation of Metal Product Characteristics with Eddy Current Inspection Methods

V. A. Syasko,
P. V. Solomenchuk

Article is devoted to the analysis of eddy current methods application for measurements of metal product controllable parameters as well as to methodical and metrological support for potential danger estimation on their basis.



КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИХРЕТОКОВЫХ МЕТОДОВ НК

С использованием вихретоковых методов производится оценка качества широкой гаммы параметров металлических изделий.

В случае несовершенства производственного цикла изготовления в изделиях могут образовываться различные виды неоднородностей структуры, которые являются местами локализации процессов разрушения. Основные дефекты, возникающие в процессе производства, это пористость, посторонние включения, поверхностные и подповерхностные трещины, отклонение состава сплава от заданного, разнотолщинность изделия или его стенки, отклонение параметров покрытия от требуемой величины и др.

В процессе эксплуатации под влиянием внешних воздействий (механических напряжений, ударных нагрузок, температуры, влаги и т. д.) в изделиях могут возникать или дальше развиваться трещи-

ны, коррозионные повреждения стенки или межслоевая коррозия (для многослойных изделий). Трудно различимые визуально поверхностные трещины могут существенно снижать предел прочности. Объемные внутренние разрушения (например, межслоевая коррозия) приводят к интегральному изменению свойств и особенно опасны.

Сказанное показывает важность количественной оценки характеристик дефектов на всех этапах жизненного цикла изделий. При этом следует учитывать, что разрушающие методы испытаний изделий или образцов для определения упругих и прочностных свойств являются дорогостоящими и не всегда приемлемыми. В этом случае невозможен стопроцентный контроль изделий.

Вихретоковые методы получили широкое распространение при производстве и эксплуатации изделий различного назначения из электропроводящих ферро- и ферромагнитных материалов в авиации, машино- и судостроении, нефтехимии, на трубопроводном транспорте и т. д. Эти методы измерения (контроля) основаны на анализе взаимодействия собственного электромагнитного поля вихретокового преобразователя (устройства, состоящего из одной или нескольких индуктивных обмоток) с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте и зависящих от степени соответствия параметров изделия заданным [1].

Все чаще при выполнении контроля вихретоковыми методами требуется количественная оценка контролируемых параметров для возможности оценки

потенциальной опасности их отклонения от нормируемой величины. Наибольшие успехи в этом направлении достигнуты при измерении удельной электропроводности ферромагнитных электропроводящих изделий, толщинометрии стенок ферромагнитных электропроводящих изделий, толщинометрии электропроводящих ферро- и ферромагнитных покрытий металлических и неметаллических изделий, измерении глубины поверхностных дефектов (трещин) и параметров коррозии изделий и их отдельных слоев.

Для расчета параметров измерительного преобразователя удобно использовать обобщенный параметр $\beta = R(2\pi f \sigma \mu_0)^{-2}$, где f – частота тока возбуждения вихретокового преобразователя; R – эквивалентный радиус обмотки возбуждения; σ – электропроводность материала; μ_0 – магнитная постоянная.

Вариация контролируемых параметров изделия в зоне протекания вихревых токов будет приводить к изменению условной интегральной электропроводности $\sigma_{\text{и}}$ и, соответственно, β .

В общем случае глубина проникновения вихревых токов σ , определяющая параметры выявляемых дефектов или отклонения параметров изделия от заданных, равна: $\sigma = (\pi f \sigma \mu_0)^{-2}$.

Для обеспечения параметров контроля минимальная толщина основания (контролируемого изделия) должна быть не менее $T_{\text{о min}} = 2,5 \sigma$, в этом случае изменение толщины изделия не будет влиять на показание.

Из указанных выше соотношений следует, что для измерения толщины по-



Сотрудники ЗАО «Константа»,
Санкт-Петербург

Сясько
Владимир Александрович

Генеральный директор, к. т. н.

Соломенчук
Павел Валентинович

Инженер



крытий, электропроводности и определения параметров поверхностных трещин значение частоты возбуждения преобразователя $f_{\text{онт}}$ должно быть: $f_{\text{онт}} \geq 6,25 / (\pi \mu_0 \sigma T_{\text{о min}}^2)$.

Для обеспечения оптимального β значение эквивалентного радиуса R обмотки возбуждения для вихретокового преобразователя следует выбирать из условия: $R = \beta(2\pi f \sigma \mu_0)^{-2}$. Для обеспечения приемлемой чувствительности к контролируемому параметру величину β следует выбирать на уровне от 5 до 60 [2] в зависимости от задачи измерения (контроля).

Чаще всего применяются следующие методы вихретокового контроля: амплитудный, частотный, фазовый, амплитудно-фазовый, многочастотный и импульсный с соответствующими информативными параметрами, величина которых зависит от значения контролируемого параметра и величины мешающих факторов.

В России традиционно уделяется большое внимание вопросам метрологического обеспечения измерений. На отечественном рынке представлена большая номенклатура отечественных и зарубежных вихретоковых приборов различного назначения. В руководстве по эксплуатации (РЭ) для каждого из преобразователей, входящих в состав прибора, обязательно оговариваются диапазон измерения контролируемого параметра x , параметры контролируемых изделий, параметры нормальных условий и допустимые диапазоны вариации мешающих факторов.

Главным различием РЭ отечественных и импортных приборов является структура указываемой погрешности измерения. Так российские производители в описании типа и в РЭ используют термин «предел допускаемой основной абсолютной погрешности измерений $\Delta(x)$ » (вновь вводимый термин «неопределенность измерений» практически не используется из-за отсутствия вразумительного толкования). В паспорте западноевропейских и американских производителей используется понятие «ассигасу», переводимое в русскоязычных вариантах РЭ как точность, вносящее дополнительную неоднозначность, т. к. форма записи соответствует зависимости $\Delta(x)$. Кроме того, для отечественных приборов оговариваются пределы дополнительных абсолютных погрешностей при изменении влияющих факторов в заданных пределах (например, температуры воздуха t , что актуально для России, шероховатости поверхности Rz и др.). Для большинства импортных приборов они не оговариваются в предположении, что их влияние можно устранить калибровкой.

В общем случае используются два варианта задания $\Delta(x)$:

а) $\Delta(x) \leq \pm(ax + b)$, где a – мультипликативный коэффициент, b – случайная составляющая погрешности, обусловленная характеристиками преобразователя и микроконтроллера;

б) $\Delta(x) \leq \pm ax$ или $\Delta(x) \leq \pm b$ в зависимости от того, что больше.

Следует учитывать, что приводимые зависимости $\Delta(x)$ подразумевают проведение испытаний приборов на эталонах контролируемых параметров, на которых производилась процедура снятия градуировочной характеристики (функциональной зависимости между измеряемой величиной x и выходным кодом $N(x)$ измерительного преобразователя). Они должны производиться в нормальных условиях, что может вводить пользователей в заблуждение относительно достоверности результатов измерения в производственных условиях.

Метрологические характеристики вихретоковых приборов определяются методом контроля, конструкцией измерительных преобразователей, применяемыми алгоритмами преобразования и вычисления контролируемого параметра по градуировочной характеристике. Существенное влияние оказывает комплекс мешающих параметров (факторов), действующих на измерительные преобразователи в процессе градуировки, калибровки и измерений. Их можно разделить на геометрические и физические. Геометрические параметры: величина измеряемого параметра x (если она геометрическая), толщина изделия T , диаметр зоны измерения D , радиус кривизны поверхности r и шероховатость Rz , расстояние от края (краевой эффект). Физические параметры: электропроводность σ , магнитная проницаемость μ , коэрцитивная сила, температура t , внешние электромагнитные поля, вибрации.

Градуировочная характеристика преобразователей представляется в виде функции, автоматически рассчитываемой по снимаемым на эталонах контролируемого параметра кодам $N(x)$.

Градуировка и поверка преобразователей и приборов чаще всего производится на эталонах контролируемого параметра (средствах измерений, предназначенных для воспроизведения и хранения единицы и передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений), на рабочих эталонах первого или второго разрядов, а также на стандартных образцах (СО) [3] в нормальных условиях.

В зависимости от контролируемого параметра это могут быть:

- **меры толщины покрытий из металлических материалов**, представляющие собой физические тела (например, диски с плоскопараллельными сторонами), состоящие из покрытия и основания [4].

В качестве рабочих эталонов 2-го разряда применяют меры толщины покрытий в диапазоне от 2 до 1000 мкм [5]. Пределы допускаемых абсолютных погрешностей изготовления и аттестации рабочих эталонов $\Delta_{\text{ра}}(h) \leq \pm [(0,1 \div 0,3) + 0,025h]$ мкм, где h – толщина покрытия. Основание меры должно иметь толщину, значительно большую, чем $T_{\text{о min}}$.

В настоящее время для аттестации (калибровки) ступенчатых мер толщины покрытий чаще всего используется профилографический метод, обеспечивающий погрешность измерения на уровне $\pm 0,1 \div 0,2$ мкм в области малых толщин.

Разработаны следующие комплекты мер толщины покрытий:

- хром/сталь20 (номер в Госреестре 8543-81) – 9 мер в диапазоне от 4 до 1000 мкм;
- хром/Л-63 (номер в Госреестре 8544-81) – 9 мер в диапазоне от 2 до 500 мкм;
- никель/Л-63 (номер в Госреестре 8545-81) – 7 мер в диапазоне от 1,6 до 100 мкм;
- никель/сталь20 (номер в Госреестре 10140-85) – 9 мер в диапазоне от 6 до 100 мкм.

Упомянутые металлические эталонные и рабочие металлические меры толщины используются, в основном, для градуировки и поверки толщиномеров покрытий и, в ряде случаев, для настройки их чувствительности. Внешний вид меры толщины покрытия никель/сталь20 представлен на рис. 1.

- **меры удельной электропроводности из металлических ферромагнитных сплавов**, представляющие собой физические тела (например, диски с плоскопараллельными сторонами), изготовленные из соответствующего сплава требуемой электропроводности.

Для градуировки, поверки и настройки чувствительности в соответствии с [6] необходимо применять государственные



Рис. 1. Внешний вид меры толщины покрытия никель/сталь20

стандартные образцы (ГСО) удельной электрической проводимости в диапазоне от 0,53 до 58,8 МСм/м:

- ГСО №№ 3447 ÷ 3458-89П (сплавы на основе титана) – 12 мер в диапазоне от 0,53 до 2,11 МСм/м;
- ГСО №№ 3435 ÷ 3446-86 (сплавы на основе меди) – 12 мер в диапазоне от 3,02 до 14,20 МСм/м;
- ГСО №№ 1395 ÷ 1412-90П (сплавы на основе алюминия) – 18 мер в диапазоне от 14,4 до 37,20 МСм/м;
- ГСО №№ 4529 ÷ 4536-89 (сплавы на основе меди) – 8 мер в диапазоне от 38,7 до 58,8 МСм/м.

Образцы должны иметь толщину, значительно большую, чем $T_{o\ min}$. Внешний вид комплекта мер удельной электропроводности представлен на рис. 2.

- **меры толщины материалов**, представляющие собой физические тела (например, диски с плоскопараллельными сторонами или ступенчатый образец). Основные требования к стандартным образцам можно сформулировать по аналогии с [7, 8].

В этом случае в качестве стандартных образцов могут применяться меры толщины в диапазоне толщин T от 0,2 до 15 мм:

- из комплекта КУСОТ 180 (КМТ-176М1), изготовленные из стали 40Х13, алюминиевого сплава Д16 или латуни Л63;

- ступенчатые образцы ОС-1 (диапазон толщин T от 0,4 до 7 мм) и ОС-2 (диапазон толщин 1 – 15 мм) с геометрическими размерами ступеньки, соответствующими диаметру зоны контроля преобразователя, изготавливаемые из стали СТ20, алюминиевых и медных сплавов по требованию заказчика.

Пределы допускаемых абсолютных погрешностей изготовления и аттестации рабочих эталонов:

$\Delta_{\text{по}}(T) \leq \pm [(0,01 \div 0,03) + 0,002T]$ мм, где T – толщина меры. В настоящее время для аттестации (калибровки) ступенчатых мер толщины чаще всего используется профилографический метод.

Стандартные образцы используются в основном для градуировки и поверки вихретоковых толщиномеров, а так-

же для настройки их чувствительности. Внешний вид ступенчатого образца ОС-1 представлен на рис. 3.

- **меры глубины искусственных дефектов типа прорези** (пропила), имитирующих поверхностную трещину аналогичной глубины, представляющие собой стандартные образцы в виде прямоугольных пластин с пазами шириной от 0,1 до 0,3 мм, глубиной от 0,1 до 10 мм, выполненными методом электроэрозии или фрезерованием на рабочей поверхности.

Стандартные образцы изготавливаются из алюминиевых или иных сплавов и сталей по требованию заказчика. Нормативная документация не регламентирует структуру сопроводительных документов, в связи с чем имеют место различия в их названиях, основных характеристиках и назначении. Для градуировки, поверки и настройки чувствительности вихретоковых дефектоскопов могут применяться следующие комплекты стандартных образцов:

- комплекты эталонных мер КСО-ВК (номер в Госреестре 33680-07);
- образцы искусственных дефектов для вихретокового контроля ОИД ВТ-1 РУ1Ш (номер в Госреестре 33618-07);
- комплекты образцов КСОП-70 (номер в Госреестре 29703-06);
- комплект мер моделей дефектов КММД-21.

В комплект стандартных образцов могут входить образцы толщины неэлектропроводящего покрытия (зазора). Внешний вид стандартного образца СО-210.01 представлен на рис. 4.

В комплект КСОП-70 входят образцы из стали 45, сплавов Д16, АК9, Л63, МА12, стали 12Х18, титанового сплава ВТ1, стали 20 и др.; в комплект КММД-21 входят образцы из стали 20, 45, 20Х13, 12Х18Н10Т, сплавов Д16, АК6, ЛМц58-2, БрАМц9-2, ВТ1-0, ОТ4-1, ВТ9 и др.

В настоящее время выпускается широкая гамма приборов для измерения указанных выше характеристик изделий. На рис. 5 представлен многофункциональный прибор измерения геометрических параметров «Константа К6».

В зависимости от типа подключенного преобразователя прибор может служить для измерения толщины покрытий (ферро- и неферромагнитных покрытий на ферро- и неферромагнитных основаниях), электропроводности и остаточной толщины стенки изделий из неферромагнитных металлов и сплавов.

Представленный на рис. 6 вихретоковый дефектоскоп серии «Phases 3d» предназначен для обнаружения различных дефектов в металлических конструкциях. Может быть настроен для измерения глубины поверхностных трещин. Также он может быть укомплектован преобразователем для измерения электропроводности неферромагнитных металлов и сплавов.

Наличие эталонных и стандартных образцов контролируемых параметров позволяет говорить о вихретоковом виде НК как об измерительном, позволяющем производить процедуры градуировки, поверки и калибровки (настройки чувствительности) преобразователей и приборов с целью получения количественной оценки характеристик металлических изделий и их дефектов в процессе производства и эксплуатации.

Оценка потенциальной опасности дефектов может осуществляться нормированием недопустимого значения кон-



Рис. 5 Внешний вид универсального прибора «Константа К6»



Рис. 2. Внешний вид комплекта мер удельной электропроводности ГСО №№ 3447 ÷ 3458-89П (сплавы на основе титана)



Рис. 3. Внешний вид ступенчатого образца ОС-1



Рис. 4. Внешний вид стандартного образца СО-210.01 с образцами толщины неэлектропроводящего покрытия



Рис. 6. Вихретоковый дефектоскоп серии «Phases 3d»

тролируемого параметра в предположении, что мешающие параметры неизменны и не оказывают влияния на выходные сигналы измерительных преобразователей. Недопустимое значение контролируемого параметра должно также задаваться сравнением с соответствующим эталоном при настройке (калибровке) приборов перед проведением обследования изделий.

Литература

1. ГОСТ 24289-80. Контроль неразрушающий вихретоковый. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1980.
2. Вихретоковый контроль. – В кн.: Неразрушающий контроль / Справочник в 7 т. // Под ред. Клюева В. В. Т. 3. Кн. 2. – М.: Машиностроение, 2003. – 347 с.
3. ГОСТ 23829-85. Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1985.
4. Потапов А. И., Сясько В. А. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий / Научное, методическое, справочное пособие. – СПб: Гуманистика, 2010. – 904 с.

5. Р 50.2.006-2001. Государственная поверочная схема для средств измерения толщины покрытий в диапазоне от 1 до 20000 мкм. Рекомендации по метрологии.

6. ГОСТ 27333-87. Контроль неразрушающий. Измерение удельной электрической проводимости цветных металлов вихретоковым методом. – М.: Изд-во стандартов, 1987.

7. ГОСТ 8.495-83. Толщиномеры ультразвуковые контактные. Методы и средства поверки. – М.: Изд-во стандартов, 1983.

8. ГОСТ 23829-85. Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1985.

Статья получена 2 ноября 2010 г.