

К ВЫБОРУ ПРИНЦИПА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВА ВЫСОКОТОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АРМАТУРЫ

Ахмедов Ш.В.¹, Шайхутдинов Д.В.¹, Горбатенко Н.И.¹, Кревченко Ю.Р.¹.

¹ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», Новочеркасск, Россия (346428, Новочеркасск, ул. Просвещения, 132), e-mail: iimt-srstu@mail.ru

В статье представлен научно-технический обзор по существующим методам неразрушающего контроля, применимого к решению задачи определения толщины защитного слоя бетона и расположения стержней арматуры в железобетонной конструкции. Описаны основные достоинства каждого из этих методов, существующие недостатки и не решенные на сегодня задачи. Проведен анализ, представлены отличительные особенности каждого метода для решения конкретной задачи. На основании результатов исследования в качестве наиболее оптимального метода для контроля качества железобетонных конструкций строительных объектов выбран вихретоковый метод неразрушающего контроля. Приведено обоснование целесообразности применения метода и разработки устройства вихретокового контроля железобетонных конструкций. Для восстановления геометрических параметров и взаимного расположения арматурных стержней предложен адаптированный метод натурно-модельных испытаний.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, вихревые токи, определение диаметра, арматура

TO THE CHOICE OF THE PRINCIPLE OF FUNCTIONING OF THE DEVICE OF HIGH- PRECISION MEASUREMENT OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF OF REINFORCEMENT BARS

Akhmedov S.V.¹, Shaykhutdinov D.V.¹, Gorbatenko N.I.¹, Krevchenko J.R.¹.

¹ Platov South-Russian State Polytechnical University (NPI), Novocherkassk, Russia (346428, Novocherkassk, st. Prosvjasheniya, 132), e-mail: iimt-srstu@mail.ru

In this paper we present a scientific and technical review of existing methods of non-destructive testing applicable to the solution of a problem of determination of thickness of a protective layer of concrete and an arrangement of reinforcement bars in a ferroconcrete structures. The paper describes the main advantages of each of these methods, the existing shortcomings and unsolved problems today. Based on this analysis presented distinguishing features of each method for a specific task. Based on the results of research as the most optimal method for quality control ferroconcrete structures was selected eddy current nondestructive testing (NDT). Given substantiation for applying the method and development of the device of eddy current testing of ferroconcrete structures. For restore the geometric parameters and relative position of rebars proposed to adapt the method of natural-model tests.

Keywords: nondestructive testing, eddy current, measuring of diameter, reinforcement bars

Строительство развивается быстрыми темпами, и с каждым днем требования к срокам и качеству выполнения заказов становятся выше. Современные строительные объекты — это сложные инженерно-технические сооружения, которые различаются по назначению, материалам, высотности, нормативным срокам службы, назначению и особенностями эксплуатации. Часто возникает потребность в реконструкции старых зданий и сооружений. Все это требует развития технологий, методов и специального оборудования для обследования зданий и сооружений, контроля их качества не только на производстве, но и на самом строительном объекте. Применение приборов контроля позволяет решать проблемы несоблюдения подрядчиками предписаний проекта и последствия неправильного монтажа,

что в свою очередь не только может привести к экономическому ущербу, но и нанести урон здоровью и жизням людей.

На сегодня существует несколько видов контроля качества строительных конструкций. Одним из основных является неразрушающий контроль (НК), который позволяет проводить измерение физических параметров объектов без их разрушения. Различные методы неразрушающего контроля позволяют определить с большой вероятностью физические и механические свойства строительной конструкции.

Цель работы: обзор и анализ существующих методов неразрушающего контроля, выбор оптимального метода для решения задачи определения толщины защитного слоя бетона и расположения стальной арматуры в железобетонной конструкции.

Методы исследований: элементы теории магнитного поля, теории измерений.

Результаты и обсуждение

Выбор оптимального метода НК следует осуществлять исходя из его особенностей объекта, чувствительности, разрешающей способности. К основным методам НК согласно ГОСТ [1] относятся: вихретоковый, магнитный, электрический, радиоволновой, тепловой, оптический, радиационный, акустический (ультразвуковой), проникающими веществами (капиллярный). Рассмотрим эти методы для решения задачи определения толщины защитного слоя бетона и расположения стальной арматуры в железобетонной конструкции. Для данного класса задач применяют вихревые, магнитные, электромагнитные, акустические и радиоволновые приборы. Виды и методы неразрушающего контроля, используемые в данных приборах, классифицируются по признакам, приведенным в таблице 1, в соответствии с государственным стандартом [1]. Рассмотрим данные методы более подробно.

Вихретоковый вид неразрушающего контроля основан на анализе взаимодействия электромагнитного поля вихретокового преобразователя (ВТП) с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте (ОК). Вихревые токи возбуждаются в ОК преобразователем, в качестве которого используется индуктивная катушка, питаемая переменным синусоидальным или импульсным током. При переменном возбуждении индуцируемый ток в ОК представляет собой вектор в комплексной плоскости. Взаимодействие индуктивной катушки с объектом контроля определяется системой уравнений Максвелла [3], описывающей электромагнитное поле в заданном пространстве и имеющей вид:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \bar{H} = \bar{J}_{\text{полн}} \\ \operatorname{rot} \bar{E} = -\partial \bar{B} / \partial t \end{cases},$$

где H и E — векторы напряженности магнитного и электрического полей соответственно; B — вектор магнитной индукции; t — время; $\bar{J}_{\text{полн}}$ — вектор плотности полного тока, определяемый выражением: $\bar{J}_{\text{полн}} = \bar{J}_{\text{пр}} + \bar{J}_{\text{см}} + \bar{J}_{\text{пер}} + \bar{J}_{\text{стор}}$, где $\bar{J}_{\text{пр}}$ — вектор плотности токов проводимости, $\bar{J}_{\text{см}}$ — смещения, $\bar{J}_{\text{пер}}$ — переноса и $\bar{J}_{\text{стор}}$ — сторонних.

По рабочему положению относительно объекта контроля преобразователи делят на проходные, накладные, экранные [8, 9] (рис. 1).

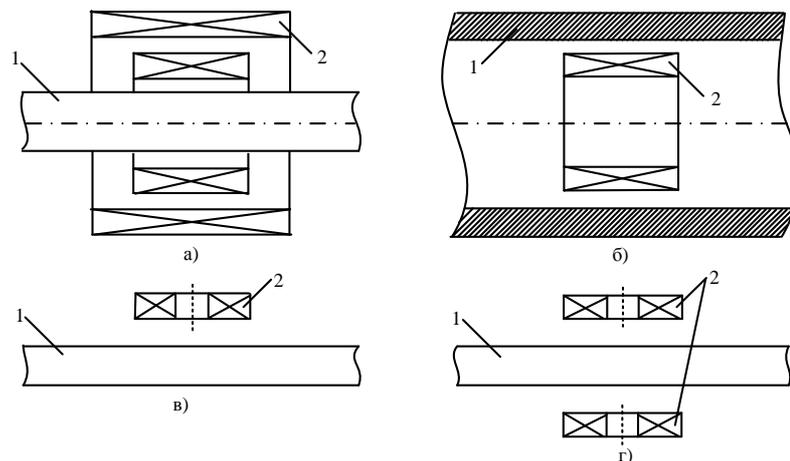


Рис. 1. Некоторые типы вихрековых преобразователей:

а, б — проходные наружный и внутренний, в — накладной, г — экранный

(1 — контролируемый объект, 2 — преобразователи)

Электромагнитное поле вихревых токов воздействует на катушки преобразователя, наводя в них ЭДС и/или изменяя их полное электрическое сопротивление (рис. 2).

На основании анализа результатов измерений, полученных с помощью первичных преобразователей (рис. 1), реализующих вихрековый метод, могут быть рассчитаны параметры несплошностей материалов (дефектоскопия и дефектометрия), геометрические параметры ОК и др. Однако при контроле одного параметра другие могут оказывать негативное влияние. Но стоит отметить, что данная особенность метода делает его более универсальным относительно других методов НК, ведь можно контролировать отдельно несколько параметров объекта либо один параметр с подавлением влияния нескольких мешающих факторов. Это достигается одновременным либо последовательным контролем при нескольких частотах тока возбуждения ВТП, либо использованием нескольких гармонических составляющих сигнала ВТП (при контроле ферромагнитных объектов). Также используют отдельное или совместное измерение фазы, частоты и амплитуды напряжения измерительного преобразователя, дополнительное подмагничивание ферромагнитных ОК постоянным магнитным полем, применяют спектральный анализ.

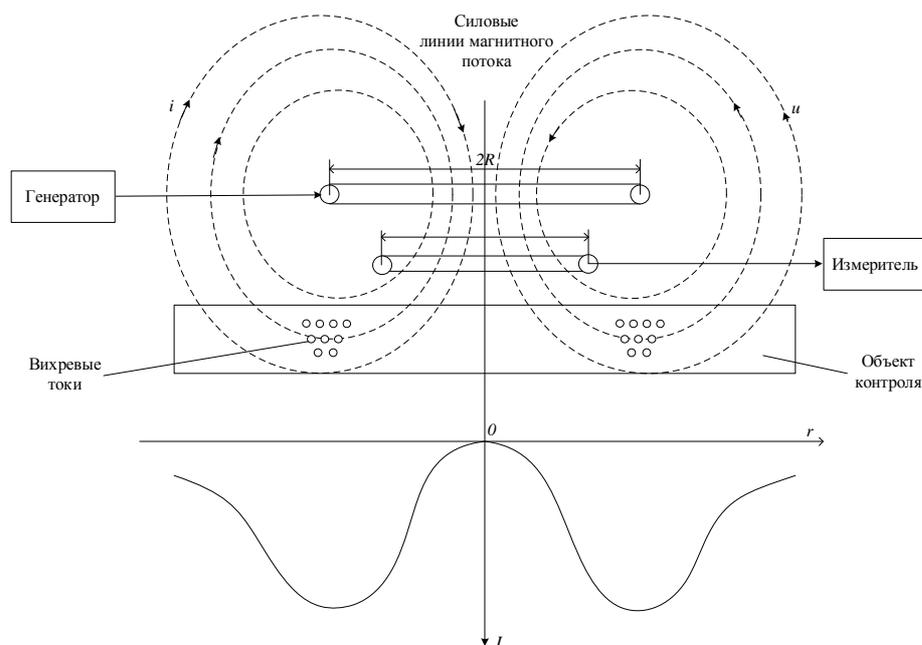


Рис. 2. Схема принципа действия прибора с накладным ВТП

Основными достоинствами данного метода являются: возможность осуществления бесконтактного и многопараметрового контроля ОК, простота конструкции ВТП, возможность контроля при движении ОК относительно ВТП с большой скоростью (до 60 м/с), возможность автоматизации контроля. При этом на сигналы вихретокового датчика оказывают незначительное влияние давление, влажность и загрязненность среды, радиационные излучения, загрязнения поверхности ОК непроводящими веществами, в результате отмечается невысокая погрешность измерений. Кроме того, известно, что до настоящего времени не все функциональные возможности данного метода были использованы. Дальнейшее совершенствование этого метода позволит избежать ряда недостатков и открыть новые направления использования вихретокового метода. К недостаткам данного метода следует отнести ограничения по глубине расположения ОК, возможность контроля только материалов из электропроводящих материалов.

Магнитные методы неразрушающего контроля основаны на анализе взаимодействия контролируемого объекта с магнитным полем и применяются, как правило, для контроля объектов из ферромагнитных материалов. В зависимости от магнитных свойств материала (коэрцитивной силы, магнитной проницаемости, остаточной индукции [10]), формы и размеров контролируемого изделия применяют два способа намагничивания: приложенного магнитного поля и остаточной намагниченности.

При намагничивании короткой детали изделия на ее торцах создаются магнитные полюсы. Если в сечении детали имеются нарушение сплошности или другая неоднородность, приводящая к изменению намагниченности, то в этом месте также образуются полюсы, поле которых образует магнитное поле рассеяния дефекта. Магнитное

поле рассеяния дефекта тем больше, чем больше дефект и чем ближе он к поверхности, над которой проводится измерение. Установить точную связь магнитного поля рассеяния дефекта с геометрическими параметрами дефектов и магнитными характеристиками изделий в аналитическом виде не представляется возможным. Для оценки этой связи пользуются различными моделями и приближениями, которые можно получить решением уравнения Лапласа для безграничной среды:

$$B = \mu_0 \mu H.$$

Количественную оценку такого магнитного поля производят посредством напряженности H : элемент контура Δl , по которому течет ток силой I , создает в произвольно выбранной точке A пространства магнитное поле напряженностью:

$$\Delta H = \frac{I \cdot \Delta l \cdot \sin \alpha}{4 \cdot \pi \cdot r^2},$$

где r – расстояние от элемента контура Δl до рассматриваемой точки; α – угол между r и Δl .

Напряженность в любой точке, расположенной на поверхности проводника ($r = r_0$), достигает максимального значения:

$$\Delta l = \frac{\Delta \alpha}{r_0}; H = \frac{I}{4\pi \cdot r_0} \int_0^\pi \sin \alpha da = \frac{I}{2\pi \cdot r_0}.$$

К основным видам магнитного неразрушающего контроля относят магнитопорошковый, феррозондовый, индукционный [10] и магнитографический. Информацию о магнитной проницаемости и ее изменении в зависимости от напряженности магнитного поля получают с помощью катушки индуктивности (индуктивный метод). Для индцирования полей рассеяния на дефектах и измерения магнитных характеристик материалов используют датчики типа феррозондов (феррозондовый метод), преобразователи Холла, магниторезисторы.

К достоинствам данного метода следует отнести сравнительно высокую чувствительность и простоту реализации. Общим недостатком для данных методов контроля является относительно невысокий диапазон контроля параметров объекта (например, определение диаметра ОК), как правило, на расстояние от ОК до 20 мм. Если не требуется определение конкретных параметров ОК, то глубина обнаружения арматуры может составлять 180 мм, после которой сигнал затухает. Кроме того, магнитный метод контроля применим только к ферромагнитным материалам.

Акустические методы неразрушающего контроля основаны на регистрации и анализе параметров упругих волн. Гармонические колебания, распространяясь в среде, создают

гармоническую упругую волну, возникающую или возбуждаемую в объекте контроля. В отличие от ранее рассмотренных методов здесь применяют и регистрируют не электромагнитные, а упругие волны, параметры которых тесно связаны с такими свойствами материалов, как упругость, плотность, анизотропия. С помощью акустических методов неразрушающего контроля возможно выявить наличие малейших дефектов, определить качество шлифовки и толщину поверхности за счет того, что акустические свойства твердых объектов и воздуха значительно разнятся. Этот вид контроля применим ко всем материалам, достаточно хорошо проводящим акустические волны: металлам, пластмассам, керамике, бетону и т.д. Чаще всего используют упругие волны ультразвукового диапазона (с частотой колебаний выше 20 кГц), этот метод называют ультразвуковым. По характеру взаимодействия с ОК различают пассивный и активный методы. Пассивный акустический метод предусматривает регистрацию упругих волн, возникающих в самом объекте. Шумы работающего механизма позволяют судить об исправности механизма и даже о характере неисправности. Этот пассивный метод акустического контроля называют шумовибрационным. Многие машины снабжают датчиками, регистрирующими уровень вибрации определенных узлов и прогнозирующими их работоспособность. Это вибрационный метод контроля и диагностики. Активный акустический метод, кроме приема колебаний и волн, использует также их излучение. Активные ультразвуковые методы применяются более широко. Для контроля используют стоячие волны (вынужденные или свободные колебания ОК или его частей), бегущие волны по схемам прохождения и отражения. Методы колебаний используют для измерения толщин при одностороннем доступе и контроля свойств материалов (модуля упругости, коэффициента затухания). Информативным параметром служат частоты свободных или вынужденных колебаний и их амплитуды.

Наиболее широкое распространение получил метод отражения, или эхометод. Средством возбуждения и приема ультразвуковых волн, как правило, служат пьезопреобразователи. Учитывая сильное отражение ультразвука от тончайших воздушных зазоров, для передачи волн от пьезопреобразователя к изделию используют жидкостный контакт. Для возбуждения волн звукового диапазона, кроме пьезопреобразователей, применяют ударное воздействие, а для приема — микрофоны.

Акустические методы контроля в строительной области используют в большинстве случаев для контроля сварных соединений арматуры (рис. 3).

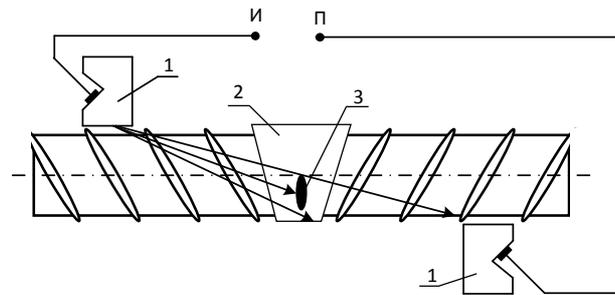


Рис 3. Наклонные искатели (И – излучатель, П – приемник) – 1; сварное соединение – 2; дефект – 3; вывод к генерирующему разъему дефектоскопа – И; вывод к входному разъему – П.

Недостатком данного метода является низкая точность при испытании объектов, расположенных на поверхности схожих с ними по акустическим свойствам основах, что делает его малоприменимым при контроле фундаментных железобетонных оснований.

Радиоволновые методы основаны на регистрации изменений параметров электромагнитных волн радиодиапазона, взаимодействующих с ОК. Радиоволновые методы и средства НК используют самостоятельно и в комплексе с другими методами. Преимущественная область применения – контроль неметаллических, а также полупроводниковых материалов, изделий и конструкций. При этом решаются задачи по толщинометрии, дефектоскопии, структуроскопии, влагометрии и скоростеметрии. Чувствительность методов зависит от поглощающих свойств материалов, а разрешающая способность — от используемого диапазона частот и некоторых геометрических параметров антенн сверхвысоких частот, СВЧ-преобразователей. Преимущество метода – его бесконтактность с ОК при значительно большем диапазоне глубины залегания ОК по сравнению с другими методами НК. Область применения методов и техники СВЧ — это контроль изделий и конструкций из диэлектрических, композиционных, ферритовых и полупроводниковых материалов, в которых радиоволны распространяются. От металлических структур радиоволны полностью отражаются, поэтому их применение возможно только для контроля геометрических параметров в определенной проекции координат и поверхностных дефектов, а для толщинометрии металлических стержней, листов проката требуется двухстороннее расположение датчиков аппаратуры по отношению к объекту контроля. Из этого следует, что данный метод контроля в поставленной задаче возможно использовать в основном для определения непосредственного расположения стержней арматуры в железобетонных конструкциях.

Заключение

Методы неразрушающего контроля необходимо сопоставлять между собой с учетом следующих обстоятельств. Во-первых, описанные выше методы НК применимы для

контроля в основном только определенных типов материалов: вихретоковый – для проводников электрического тока; магнитный – для ферромагнетиков; акустический – для материалов, обладающих небольшим затуханием звуковых волн соответствующей частоты; радиоволновой – для неметаллических, в которых радиоволны распространяются.

Во-вторых, следует иметь в виду различия в модификации методов в зависимости от их предназначения: измерение геометрических размеров, поиск объемных или поверхностных дефектов и т.д. Поэтому решение об использовании того или иного метода НК необходимо принимать с учетом всех факторов, действующих при исследовании ОК.

Исходя из приведенного анализа перечисленных средств диагностики и контроля, преимуществ и недостатков каждого из них, а также поставленной задачи наиболее универсальным для контроля качества железобетонных конструкций строительных объектов, определения диаметра стержней арматуры является вихретоковый неразрушающий контроль. Благодаря высокой информативности, а также таким достоинствам, как отсутствие необходимости непосредственного контакта с объектом, безвредность, надежность, высокая производительность и простота автоматизации, вихретоковое измерительное преобразование имеет широкие возможности применения. Кроме того, несмотря на многообразие видов ВТП и способов выделения информации, имеется множество уже поставленных, но еще не решенных задач. Представленные на рынке устройства, использующие вихретоковый метод неразрушающего контроля, в большинстве случаев не удовлетворяют конкретным требованиям заказчика, таким как определение диаметра арматуры в сечениях железобетонных конструкций, за счет невысокой точности измерения. Для решения данной задачи предлагается использовать оригинальный матричный измерительный преобразователь, представляющий собой совокупность катушек индуктивностей. Обработка результатов измерений представляет собой классическую обратную задачу. Для ее решения будет использован метод натурно-модельных испытаний, использующий результаты натурального испытания для подстройки геометрических параметров модели конструкции, что позволяет получить в ограниченное время прогноз о свойствах испытываемого объекта, существенно сокращая натурные испытания в целом [2, 4-7].

Список литературы

1. ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.
2. Бахвалов Ю.А., Горбатенко Н.И., Гречихин В.В., Грекова А.Н. Применение обратных задач теории магнитных полей в проектировании энергосберегающих электромеханических устройств // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2013. № 5. С. 28–32.

3. Вайнштейн Л. А. Электромагнитные волны. — М.: Радио и связь, 1988.
4. Горбатенко Н.И. Натурно-модельные испытания изделий из ферромагнитных материалов. Ростов н/Д.: Изд-во Северо-Кавказского научного центра высшей школы, 2001. — 392 с.
5. Горбатенко Н.И., Гречихин В.В. Комбинированный метод магнитных цепей и граничных элементов для определения магнитных характеристик материалов изделий // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2000. № 1. С. 15.
6. Горбатенко Н.И., Гречихин В.В., Юфанова Ю.В. Методы моделирования магнитного поля в натурно-модельном эксперименте//Изв. вузов. Электромеханика. 2002. № 4. С. 29–34.
7. Ковалев О.Ф., Горбатенко Н.И. Численно-экспериментальный метод определения статических характеристик электромагнитных систем // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2012. № 2. С. 46–49.
8. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. / Под ред. В.В. Клюева. Т. 2: Кн. 2: Ю.К. Федосенко, В.Г. Герасимов, А.Д. Покровский, Ю.Я. Останин. Вихретоковый контроль. М.: Машиностроение, 2006. 688 с.
9. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под ред. В.В. Клюева. Т. 6: В 3 кн. Кн. 1: В.В. Клюев, В.Ф. Мужичкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. Магнитные методы контроля. Кн. 2: В.Н. Филинов, А.А. Кеткович, М.В. Филинов. Оптический контроль. Кн. 3: В.И. Матвеев. Радиоволновой контроль. – Изд. 2-е, испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 832 с.: ил.
10. Шайхутдинов Д.В. Датчик и прибор для измерения магнитных параметров листовой электротехнической стали. Н.И. Горбатенко, Ш.В. Ахмедов, М.В. Шайхутдинова // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 4; URL: <http://www.science-education.ru/110-9756>.

Рецензенты:

Гречихин В.В., д.т.н., профессор кафедры «Информационные и измерительные системы и технологии», ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск;

Кириевский Е.В., д.т.н., профессор кафедры «Информационные и измерительные системы и технологии» ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск.