

УДК 620.19

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ОБОЛОЧКОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ

Хуснутдинова И.Г., Баширов М.Г., Усманов Д.Р., Хуснутдинова Л.Г.

Филиал ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,
Салават, e-mail: ilvina011@mail.ru

Для оценки состояния металла технологического и энергетического оборудования предлагается использование метода динамической идентификации, основанного на анализе координат расположения корней характеристического уравнения (полинома знаменателя передаточной функции системы «объект контроля – электромагнитно-акустический преобразователь») на комплексной плоскости. Передаточная функция исследуемой системы «объект контроля – электромагнитно-акустический преобразователь» является интегральным количественным параметром, характеризующим состояние металла. Проведены теоретические и экспериментальные исследования взаимосвязи электрофизических и механических свойств конструкционных сталей, изменений электрофизических свойств конструкционных сталей в процессе деформирования-разрушения, частотных и динамических характеристик системы «объект контроля – электромагнитно-акустический преобразователь» при изменениях механических и электрофизических свойств конструкционных сталей в процессе накопления повреждений. Рассмотрены существующие способы и приборы для неразрушающего контроля металлических элементов электроэнергетического оборудования, использующие электромагнитно-акустическое преобразование.

Ключевые слова: передаточная функция, электромагнитно-акустический метод, напряженно-деформированное состояние металла, поврежденность, отказ

ASSESSMENT OF DAMAGE OF SHELL STRUCTURES USING ELECTROMAGNETIC ACOUSTIC CONTROL METHODS

Khusnutdinova I.G., Bashirov M.G., Usmanov D.R., Khusnutdinova L.G.

Branch of SEI HPE «Ufa State Petroleum Technological University»,
Salavat, e-mail: ilvina011@mail.ru

To assess the state of the metal technological and energy equipment are invited to use dynamic identification method based on the analysis of the coordinate location of the roots of the characteristic equation (denominator polynomial of the transfer function of the «object of control – electromagnetic acoustic transducer») in the complex plane. The transfer function of the system under study «object of control – electromagnetic acoustic transducer» is an integral quantitative parameters characterizing the state of the metal. Theoretical and experimental studies of the electrical interconnection and mechanical properties of structural steels were conducted, changes of the electrical properties of the structural steel in the process of deformation, fracture frequency and dynamic characteristics of the system «object of control – electromagnetic acoustic transducer» with changes of mechanical and electrical properties of structural steels in the process of accumulation of damages. The existing methods and tools for non-destructive testing of metallic elements of power equipment using electromagnetic-acoustic conversion were reviewed.

Keywords: transfer function, electromagnetic acoustic method, the stress-strain state of the metal, damage, malfunction

В настоящее время расчеты на прочность конструктивных элементов и оценка работоспособности длительно эксплуатируемого технологического оборудования, продление жизненного цикла оборудования с назначенным сроком безопасной эксплуатации осуществляется по методикам, не учитывающим реальные изменения в структуре и изменения механических свойств конструкционных материалов в процессе эксплуатации, что снижает достоверность результатов, создает предпосылки для возникновения аварийных ситуаций, сопровождающихся значительным экономическим и экологическим ущербом.

Для оценки реальных изменений в конструкционных материалах, определения фактического технического состояния и ресурса безопасной эксплуатации кон-

структивных элементов технологического оборудования предлагается использовать электромагнитно-акустический (ЭМА) преобразователь, принцип действия которого основан на бесконтактном генерировании в металле ультразвуковых колебаний с помощью вихревых токов, возбуждаемых специальной обмоткой, и источника постоянного магнитного поля. Электромагнитно-акустический метод позволяет выявлять зоны аномальных концентраций механических напряжений в элементах крупногабаритных оболочковых конструкций, в этих зонах зарождаются дефекты структуры металла и в дальнейшем развиваются макродефекты, ведущие к разрушению оборудования [2].

Анализ исследований в области разработки методов и средств количественной

оценки степени напряженно-деформированного состояния и поврежденности металлических конструкций позволил выявить работы, в которых опубликованы наиболее значительные достижения.

В работе О.В. Андреевой и Д.В. Дмитриева «Использование активных моделей внешнего вида при исследовании степени поврежденности микроструктуры поверхности металлов и сплавов» получены зависимости длительности прохождения ультразвуковой волны и интенсивности затухания колебательного переходного процесса от статических растягивающих нагрузок [1].

В изобретении «Способ неразрушающего контроля степени поврежденности металлов эксплуатируемых элементов теплоэнергетического оборудования» А.Н. Смирнова и др. предлагается критерий оценки степени поврежденности металла элементов энергооборудования. Для этого замеряется задержка поверхностной волны ультразвуковых колебаний на поверхности металла нового элемента, задержка поверхностной волны в зоне аварийного разрушения металла элемента и задержка поверхностной волны на поверхности металла в контролируемой зоне элемента, находящегося в процессе эксплуатации. Затем определяется критерий K_p степени поврежденности поверхности металла [7].

В работе Т.Р. Бикбулатова «Оценка остаточного ресурса оборудования и предельного состояния конструкционных материалов при усталостном нагружении по результатам электромагнитных измерений» установлена зависимость изменения электромагнитных свойств стали 09Г2С от степени накопления усталостных повреждений в упруго-пластической области деформирования, которая показывает, что среднее и действующее значения напряжения отклика электромагнитного сигнала имеют общую тенденцию снижения, а при достижении $N/N_p = 0,8$ (N/N_p – отношение количества циклов нагружения на момент измерения к количеству циклов до разрушения) наблюдается экстремум, соответствующий предельному состоянию материала [4].

Сотрудники ГУП «Московский научно-исследовательский и проектный институт типологии, экспериментального проектирования» разработали методику динамического зондирования и ранней диагностики деформационного состояния несущих конструкций, основанную на анализе изменения передаточных функций, разработанных для различных по высоте участков здания. Под передаточной функцией части здания понимается отношение компонентов спектров мощности, зарегистрированных сигнала

лов в двух точках здания, а именно: в месте динамического воздействия, заданного, например, в виде широкополосного импульса от неупругого удара, и в месте регистрации отклика этого воздействия, прошедшего через рассматриваемую часть здания. Такая передаточная функция характеризует напряженно-деформированное состояние конструкций именно в той части здания, через которую прошел заданный широкополосный импульс [5].

В работе Н.А. Щипакова «Разработка методики и аппаратуры акустической тензометрии трубопроводов» экспериментально подтверждена возможность определения напряжения при двусосном напряженно-деформированном состоянии при помощи головных волн, разработан комплексный ЭМА преобразователь для определения интегральных по толщине металла значений механических напряжений [8].

В настоящее время не разработаны детальная процедура использования ЭМА метода для оценки степени напряженно-деформированного состояния и поврежденности металлических крупногабаритных оболочковых конструкций и способы обработки полученной диагностической информации. Существуют руководства, предназначенные в первую очередь для учебных целей, обзоры общих принципов реализации данного метода. ЭМА метод является перспективным для практического применения, так как является бесконтактным, предоставляет возможность применения к динамическим объектам, к объектам с шероховатой поверхностью, покрытым слоем изоляции, краски.

Экспериментальная часть

Для исследования электромагнитно-акустического метода на кафедре «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» филиала ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» разработана экспериментальная установка. Схема экспериментальной установки изображена на рис. 1. На схеме изображена универсальная испытательная машина УММ-5 с электро-механическим приводом, предназначенная для статических испытаний на растяжение, сжатие, изгиб и срез. В качестве объектов исследования выбраны образцы для испытания на растяжение, выполненные из сталей марок Ст 10, Ст 20, 09Г2С. Генераторная обмотка ЭМА преобразователя подключена к выходам генераторного модуля прибора АКТАКОМ, измерительная обмотка ЭМА преобразователя подключена параллельно к входам модуля «осциллограф» прибора

АКТАКОМ и персонального компьютера со специальным программным обеспечением. С помощью испытательной машины УММ-5 в образцах различных марок сталей создавались механические напряжения, генераторной обмоткой ЭМА преобразователя в образцах возбуждались упругие колебания ультразвуковых частот. Информация о состоянии металла, содержащаяся в параметрах ультразвуковой волны, преобразуется в параметры вихревых токов и считывается измерительной обмоткой преобразователя. Текущее состояние системы «объект контроля – электромагнитно-акустический преобразователь» описывается дифференциальным уравнением. Входным воздействием являются импульсы вихревых токов, которые в сочетании с постоянным магнитным полем генерируют ультразвуковые волны в контролируемом изделии. Выходной величиной системы является сигнал измерительной обмотки ЭМА преобразователя. Для анализа динамических характеристик системы «объект контроля – электромагнитно-акустический преобразователь» используется её передаточная функция. Идентификация состояния металла объекта контроля осуществляется на основе анализа координат расположения корней характеристического уравнения (по-

линома знаменателя передаточной функции системы «объект контроля – электромагнитно-акустический преобразователь») на комплексной плоскости.

Внешний вид разработанного ЭМА преобразователя представлен на рис. 2. ЭМА преобразователь состоит из индуктора, расположенного с возможностью направления на объект контроля. Выше индуктора располагается постоянный неодимовый магнит с остаточной магнитной индукцией B_r , равной 1,45 Тл. Индуктор выполнен в форме «бабочки» из 20 витков на основании из стеклотекстолита, расстояние от центра витка до поверхности металла 3 мм. Такое расположение индуктора и постоянного магнита позволяет возбуждать в объекте контроля поперечную ультразвуковую волну. Корпус ЭМА преобразователя выполнен с использованием 3D принтера. На генераторную обмотку преобразователя поступают прямоугольные импульсы тока, которые наводят вихревые токи в объекте контроля. Под действием сил Лоренца в объекте контроля возбуждаются ультразвуковые колебания, параметры которых изменяются при взаимодействии со структурой металла и приводят к изменению параметров вихревых токов. Изменение параметров вихревых токов воспринимается измерительной обмоткой.

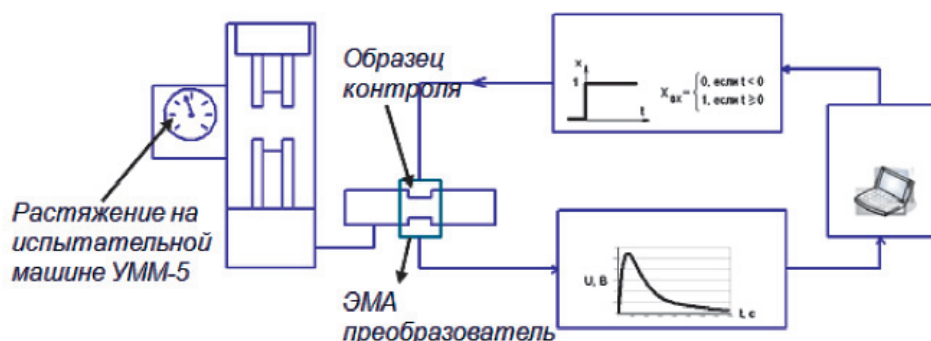


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

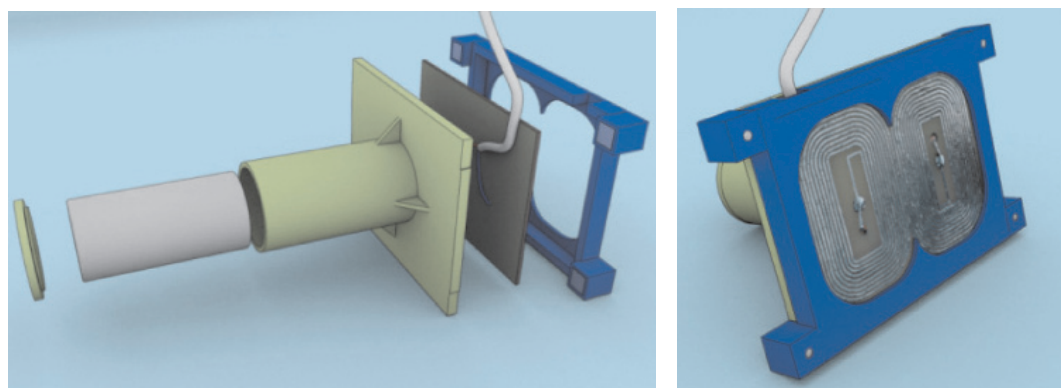


Рис. 2. Разработанный ЭМА преобразователь

Выводы

По кривым переходного процесса в системе «объект контроля — электромагнитно-акустический преобразователь», полученным при подаче на вход импульсов тока, были определены передаточные функции. Передаточная функция является интегральным параметром, позволяющим оценивать состояния объекта контроля. Анализ параметров передаточной функции и определение корней характеристического уравнения передаточной функции производились с использованием программы ТАУ-2 [6].

Результаты исследований позволили выявить области на комплексной плоскости расположения корней характеристического уравнения системы «объект контроля — электромагнитно-акустический преобразователь», которые характеризуют упругую деформацию металла. Выход координат корней характеристического уравнения за пределы этих областей соответствует переходу металла из области упругой деформации в область упруго-пластической и пластической деформации и рассматривается как потеря устойчивости системы [3].

При изменении параметров переходного процесса меняются координаты расположения корней характеристического уравнения передаточной функции на комплексной плоскости, отражающие напряженно-деформированное состояние и уровень поврежденности металла.

Список литературы

1. Андреева О.В. Использование активных моделей внешнего вида при исследовании степени поврежденности микроструктуры поверхности металлов и сплавов / О.В. Андреева, Д.В. Дмитриев // Современные проблемы науки и образования. — 2015. — № 1; URL: www.science-education.ru/121-18713 (дата обращения: 09.06.2015).
2. Баширов М.Г. Оценка напряженно-деформированного состояния и уровня поврежденности металла нефтегазового оборудования / Баширов М.Г., Усманов Д.Р., Хуснутдинова И.Г. // Теоретические и прикладные аспекты современной науки: сборник научных трудов по материалам VI Международной научно-практической конференции в 6 частях; по общ. ред. М.Г. Петровой. — Белгород: ИП Петрова М.Г., 2015. — С. 27–29.
3. Баширова Э.М. Оценка предельного состояния металла оборудования для переработки углеводородного сырья

с применением электромагнитного метода контроля: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03, 05.02.01, УГНТУ. — Уфа: [б. и.], 2005. — 130 с.

4. Бикбулатов Т.Р. Оценка остаточного ресурса оборудования и предельного состояния конструкционных материалов при усталостном нагружении по результатам электромагнитных измерений: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.26.03. — Уфа, 2011. — 24 с.: ил.

5. Гурьев В.В. Особенности диагностики технического состояния несущих конструкций высотных зданий / В.В. Гурьев, В.М. Дорофеев // Уникальные и специальные технологии в строительстве. — № 1/2004. — 26.05.2005.

6. Кирюшин О.В. Пакет TAU, версия 2.0 для Windows. — URL: <http://www.ahtp.rusoil.net/tauwin.htm>.

7. Патент РФ № 2231057, 20.06.2004 Способ неразрушающего контроля степени поврежденности металлов эксплуатируемых элементов теплоэнергетического оборудования / Смирнов А.Н. (RU), Хапонен Н.А. (RU).

8. Щипаков Н.А. Разработка методики и аппаратуры акустической тензометрии трубопроводов: дис. ... канд. техн. наук : 05.02.11. — М., 2012. — 109 с.: ил.

References

1. Andreeva O.V., Dmitriev D.V. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2015. no. 1; Available at: www.science-education.ru/121-18713 (accessed: 09.06.2015).
2. Bashirov M.G., Usmanov D.R., Husnutdinova I.G. Teoreticheskie i prikladnye aspekty sovremennoy nauki sbornik nauchnykh trudov po materialam VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii v 6 chastyah. Belgorod: IP Petrova M.G., 2015. pp. 27–29.
3. Bashirova E.M. kand. tehn. nauk: 05.26.03. Ufa: [b. i.], 2005. 130 p.
4. Bikbulatov T.R. avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: 05.26.03. Ufa, 2011. 24 p.: il.
5. Gurev V.V., Dorofeev V.M. Zhurnal «Unikalnye i specialnye tehnologii v stroitelstve». no. 1/2004. 26.05.2005.
6. Kirjushin O.V. Paket TAU, versija 2.0 dlja Windows. Available at: <http://www.ahtp.rusoil.net/tauwin.htm>.
7. Patent RF no. 2231057, 20.06.2004 Smirnov A.N. (RU), Haponen N.A. (RU).
8. Shhipakov N.A. dissertacija ... kandidata tehnikeskikh nauk. M., 2012. 109 s.: il.

Рецензенты:

Вильданов Р.Г., д.т.н., профессор кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий», филиал, ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Салават;

Жирнов Б.С., д.т.н., профессор, филиал, ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Салават.