

# ОТЧЕТЫ О РАБОТЕ СЕКЦИЙ XXII ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ\* (продолжение)

## СЕКЦИЯ № 7. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ НА ТРАНСПОРТЕ, В ЭНЕРГЕТИКЕ И ГРАЖДАНСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

### Руководители:

**МАРКОВ Анатолий Аркадьевич,**

д-р техн. наук, ОАО «Радиоавионика», Санкт-Петербург

**МОСЯГИН Владимир Валентинович,**

канд. техн. наук, ОАО «Радиоавионика», Санкт-Петербург

На 7-й секции «Неразрушающий контроль на транспорте, в энергетике и гражданском строительстве» были прослушаны и обсуждены интересные доклады по: ультразвуковому и вихретоковому контролю колесных пар колес подвижного состава в процессе технического обслуживания, ультразвуковому контролю железнодорожных рельсов в процессе эксплуатации, оценке состояния теплообменных аппаратов и контуров электрических станций в энергетике, современным визуально-измерительным шаблонам и применению моделиро-

вания с помощью аддитивных технологий в целях обучения. Также в эту секцию были вынесены темы по проекту МАГАТЭ RER1018 и вопросы, связанные с обнаружением дефектов силовых трансформаторов.

В работе Г.Я. Дымкина, А.В. Шевелева, А.В. Куркова, И.А. Смирнова, А.Д. Шубина показаны методика и опыт контроля гребней бандажа колес локомотивов. Отличием данного подхода является возможность проверки всей поверхности бандажа при затрудненном доступе (прямо под локомотивом) с помощью поверхностных волн, обтекающих колесо. При этом достигается обнаружение поперечных трещин, развивающихся от поверхности, глубиной от 1 мм, а временные затраты на контроль составляют 5–7 мин.

В докладе П.В. Соломенчука представлена технология вихретокового контроля колесных пар вагонов в условиях цехового ремонта. Отличием является система сканирования многоканальными вихретоковыми преобразователями, устанавливаемыми вблизи семи областей колесной пары – диска, обода и ступицы. Общее время контроля одной колесной пары составляет 20 мин вместо 6 ч по традиционной технологии (до 30 пар вместо двух за смену). Сканирование пары осуществляется автоматизированно, путем ее вращения на стенде, в состав которого входят настроечная колесная пара с моделями дефектов и консольный кран.

Н.В. Мелешко, Г.Г. Газизова, А.В. Дубина, М.В. Чаевский представили систему иммерсионного механизированного ультразвукового контроля железнодорожных колес в условиях депо. Отличие состоит в том, что в процессе вращения колесной пары осуществляется частичное погружение цельнокатаного обода колеса в ванну с водой и добавкой ингибитора коррозии. За счет этого достигается наличие постоянного иммерсионного слоя для ввода и приема акустических колебаний в эхоимпульсном режиме. Как следствие, обеспечивается стабильность акустического контакта и исключается механический износ преобразователей.



А.А. Марков, выступает В.В. Мосягин



Выступает П.В. Соломенчук

\* Начала см. «Территория NDT», 2020, № 2

Работа С.Л. Молоткова, В.В. Мосягина, А.А. Маркова, Г.А. Иванова посвящена вопросам повышения информативности скоростного ультразвукового контроля рельсов, уложенных в путь, вагонами-дефектоскопами. Предложено использовать сочетание эхо-и зеркально-теневого методов при наклонном вводе продольными волнами. При этом достигается возможность выявления дополнительных эксплуатационных трещин в шейке рельса. За счет регистрации и анализа параметров огибающих амплитуд донных сигналов при наклонном вводе акустических колебаний в ряде случаев удается определять параметры трещин, превосходящих по точности для эхометода и вне зависимости от ориентации плоскости трещины.

Доклад А.Е. Шубочкина, А.Г. Ефимова, Д.И. Галкина, Е.В. Мартянова сфокусирован на проблеме визуального и измерительного контроля сварных швов и соединений металлоконструкций в части обеспечения требований нормативных документов к допускаемой погрешности измерений. В качестве решения представлен новый универсальный измерительный шаблон с нониусом, обеспечивающий более точные измерения по отношению к массово эксплуатируемым способам. Техническое решение в основе шаблона защищено патентом на изобретение. Точность достигается за счет конструкции, материалов и более технологичного производства шаблона.

Данная работа участвовала и была отобрана среди лучших 20 работ в конкурсе инноваций, проходящем на форуме параллельно с научно-технической конференцией.

В работе Д.И. Галкина, Е.В. Мартянова показаны примеры успешного использования трехмерных моделей объектов контроля, выполненные по аддитивной технологии, при обучении и сертификации персонала. В отличие от реальных образцов сварных швов, обладающих значительными габаритами, массой и подверженных коррозии, их печатанные трехмерные копии лишены указанных недостатков и к тому же позволяют заложить дефекты требуемых размеров и обеспечить повторяемость. В процессе обучения трехмерные модели используются для отработки технологии контроля, траектории и шага сканирования и т.д.

Доклад В.Г. Крицкого, И.С. Мелкумова, С.О. Пинежского, Н.А. Прохорова, П.С. Стяжкина про мониторинг состояния сталей в контурах электрических станций высветил проблематику и инновационные подходы к оценке состояния стенок ответственных объектов энергетики. Помимо традиционных ультразвукового и вихретокового контроля для оперативного контроля коррозионного состояния металла разработаны и используются специальные датчики. Научной предпосылкой такого



А.Е. Шубочкин

контроля является принципиальная зависимость тока и вида коррозии от потенциала материала и окружающей рабочей среды. Предлагается использовать рабочий электрод из материала контура и вспомогательный электрод из специального сплава, а измеренные значения пересчитывать в значения относительно стандартного водородного электрода. Работоспособность системы коррозионного мониторинга на базе высокотемпературных электродов, апробированных на референтных энергоблоках, была проверена на стенде в средах, моделирующих котловую воду парогенератора.

Работа Д.В. Иншакова, К.А. Кузнецова сконцентрирована на применении метода акустической импульсной рефлектометрии для диагностики технического состояния теплообменных аппаратов на опасных производственных объектах в период остановочного ремонта. Проанализированы возможные подходы к решению проблемы, связанной с ограниченным временем на обследование, большой суммарной протяженностью трубок в пучках и нечеткостью диагностических признаков дефектности трубок. Предлагается использование метода акустической импульсной рефлектометрии с анализом распределения трубок по степени дефектности.

Особенности магнитной дефектоскопии оттяжек высотных сооружений были рассмотрены в докладе Е.Б. Дыскина. Показано, что современные магнитные дефектоскопы с дистанционным управлением позволяют уверенно измерять уровень коррозионного повреждения оттяжек и обнаруживать обрыв отдельных проволок канатов. На основании данных магнитной дефектоскопии можно оценить остаточный ресурс оттяжки и при необходимости прогнозировать ее замену.

В целом работа секции прошла на весьма высоком уровне. Доклады вызвали живой интерес слушателей. Даже после завершения работы секции в рабочем порядке еще долго заинтересованные участники конференции задавали вопросы докладчикам и обсуждали поднятые в докладах вопросы.

Отчет подготовил  
В.В. Мосягин

## СЕКЦИЯ № 8. ЦИФРОВАЯ РАДИОГРАФИЯ И КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ

### Руководители:

**АРТЕМЬЕВ Борис Викторович**,  
д-р техн. наук, ЗАО «НИИИИ МНПО  
«Спектр», Москва

**ГАЛКИН Денис Игоревич**,  
канд. техн. наук, ЗАО «НИИИИ МНПО  
«Спектр», Москва

В рамках 8-й секции «Цифровая радиография и компьютерная томография» участниками конференции были сделаны пять докладов.

В докладе «Повышение чувствительности гетерогенных ионизационных камер» авторы Б.В. Артемьев, И.Б. Артемьев, Л.В. Владимиров, Д.И. Галкин – сотрудники ЗАО МНПО «Спектр» и МГТУ им. Н.Э. Баумана рассказали об опыте создания и модификаций гетерогенных камер, эффективно работающих в диапазоне энергий электромагнитных квантов от 20 до 100 кэВ. В качестве практических примеров приводились запатентованные авторами конструкции, не требующие внешнего питания.

В докладе «Учет спектрального распределения энергии источника в алгебраических алгоритмах реконструкции томографических изображений» сотрудника ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. Академика Е.И. Забахина» (ФГУП РФЯЦ) А.Н. Кисилева предложен метод учета спектрального распределения энергии источников рентгеновского излучения, применение которого совместно с итерационной реконструкцией томографических изображений позволяет существенно повысить корреляцию получаемых модельных данных с исходными значениями.



*Б.В. Артемьев*

Авторы А.Б. Коновалов и В.В. Власов, сотрудники ФГУП РФЯЦ, в своем первом докладе «Перспективные стратегии регуляризации в томографии с неполным набором данных» сформулировали четыре стратегии регуляризации и представили сравнительный анализ результатов работы этих алгоритмов в условиях неполного набора проекционных данных. Во втором докладе «Применение сверточных нейронных сетей для регуляризации в малоракурсной компьютерной томографии» рассмотрен способ адаптивной фильтрации с применением сверточных нейронных сетей. Показана возможность реконструкции тестового объекта, прототипом которого послужили фантом Шерпа–Логана и метка QR-кодировки, по минимальному числу проекций. При отсутствии шумов в исходных данных число проекций может быть уменьшено до семи ракурсов при использовании алгоритма ART-TV.

В докладе «НК для сохранения культурного наследия» авторы Б.В. Артемьев и И.Б. Артемьев сделали обзор возможно-



*Д.И. Галкин*

стей неразрушающего контроля по анализу, идентификации и реставрации произведений искусства и других памятников культурного наследия. Показано, что новые возможности методов НК, использующих электромагнитное излучение различных длин волн и совершенствование технологий формирования излучения: повышение стабильности источников, возможность точной регулировки анодного напряжения у рентгеновских аппаратов или вектора поляризации у других источников электромагнитного излучения, высокая чувствительность и стабильность детекторов, позволяют использовать оборудование неразрушающего контроля не только для выявления неоднородностей и геометрической структуры изучаемых объектов, но и для обнаружения незаконных вложений и скрытых изображений, пресечения попыток создания дубликатов, выдаваемых за авторские произведения.

*Отчет подготовил  
Б.В. Артемьев*

## СЕКЦИЯ № 9. ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

### Руководители:

#### **МАЧИХИН Александр Сергеевич,**

д-р техн. наук, НТЦ УП РАН, НИУ «МЭИ», Москва,  
АО «НПО «Энергомаш» им. академика В.П. Глушко», Химки

#### **КАЛОШИН Валентин Александрович,**

канд. техн. наук, АО «НПО «Энергомаш» им. академика  
В.П. Глушко», Химки



*В.А. Калошин, А.С. Мачихин*

Заседание секции «Оптический контроль» состоялось 5 марта. В работе секции приняли участие сотрудники НТЦ УП РАН, НИУ «МЭИ», АО «НПО «Энергомаш» им. академика В.П. Глушко», МГТУ им. Н.Э. Баумана. Было заслушано девять докладов, посвященных современным оптическим методам и аппаратно-программным средствам неразрушающего контроля изделий и материалов, разработанным в интересах различных отраслей промышленности: ракетостроения, авиации, энергетики и др. Каждый доклад сопровождался интересной дискуссией о достоинствах и перспективах практического применения полученных результатов.

Сотрудники НТЦ УП РАН д-р физ.-мат. наук С.В. Боритко и А.В. Карандин представили спектрометр на основе акустооптической ячейки со скачкообразной фазовой манипуляцией и показали возможность создания нового класса приборов — дифференциальных спектрометров с произвольной адресацией, работающих в реальном масштабе времени.

Доклады доцента МГТУ им. Н.Э. Баумана канд. техн. наук П.А. Носова и аспиранта НИУ «МЭИ» А.Н. Быханова были посвящены созданию новых компонентов для управления характеристиками оптического излучения.

П.А. Носов в своей работе рассмотрел вопросы расчета лазерных вариосистем, предназначенных для формирования гауссова пучка с плавным изменением продольного положения перетяжки гауссова пучка постоянного диаметра и для формирования гауссова пучка с плавным изменением диаметра перетяжки на фиксированном расстоянии от ла-

зера. Это востребовано для реализации современных лазерных технологий (обработка материалов, манипулирование микрообъектами и др.), где необходимо формирование в рабочей зоне лазерного пучка с требуемыми пространственными параметрами. Если требования и/или условия практической задачи меняются, нужно лазерное излучение с другими пространственными параметрами. Это приводит к необходимости заменять формирующую оптическую систему. При этом выполняется такая трудоемкая и дорогостоящая операция, как юстировка оптического блока лазерной системы. Этого недостатка лишены лазерные вариосистемы, в которых за счет перемещения компонентов и/или изменения их фокусного расстояния изменяются параметры выходного пучка, обеспечивая при этом изменение плотности мощности излучения в рабочей зоне. Такие лазерные оптические системы отличаются универсальностью, заменяют набор оптических насадок и снижают стоимость лазерных приборов и оборудования.

А.Н. Быханов представил исследование, посвященное созданию компактных компонентов для



*А.В. Карандин*



*П.А. Носов*



П.С. Мартьянов



А.А. Быков



Б.А. Чичигин

прецизионной фокусировки оптического излучения, основанных на дифракции света на бесселевых акустических пучках, создаваемых цилиндрическим пьезопреобразователем в жидкости. Для повышения эффективности дифракции предложено применять одновременное возбуждение двух акустических волн разных частот внутри такой акустооптической линзы. Показано, какие сочетания частот оптимальны с точки зрения максимизации концентрации излучения в центральном максимуме.

Аспирант НИУ «МЭИ» А.А. Быков представил результаты экспериментальных исследований в области теплового контроля. Для задач термографии объектов с неоднородным распределением из-

лучательной способности предложено использовать видеоспектрометр. Показано, что такой подход может иметь как научные, так и промышленные приложения.

Доклад канд. техн. наук П.С. Мартьянова (ИТЦ УП РАН) был посвящен разработке устройства для определения концентрации угарного газа в воздухе в бытовых помещениях. Особенностью данного устройства является возможность работы в удаленном режиме, при котором дистанционно регистрируется информация о концентрации угарного газа, что актуально для обеспечения безопасности и своевременной помощи находящимся в помещениях людям, которые могут быть подвергнуты воздействию этого газа.

Исследования доцента НИУ «МЭИ» канд. техн. наук А.Ю. Поройкова, проведенные совместно с ООО «Спутникс» и ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», направлены на создание измерительных систем трехмерного машинного зрения. Представлены характеристики и результаты лабораторных исследований по тестированию разработанных программно-аппаратных комплексов. Получена оценка погрешности измерений с применением созданных систем. На базе одной из разработанных стереосистем предложено создание летной лаборатории на основе беспилотного аппарата, что позволит отрабатывать уже существующие и разрабатывать новые методы и методики проведения полетных испытаний.

Особого внимания заслуживают доклады канд. техн. наук Б.А. Чичигина (НИУ «МЭИ») и Д.Д. Хохлова (ИТЦ УП РАН), посвященные разработке отечественных измерительных видеоэндоскопических средств контроля труднодоступных полостей промышленных объектов.

Прототип систем измерительной дефектоскопии, разработанный Б.А. Чичигиным, представляет собой оптическую малогабаритную систему, закрепленную на гибком средстве доставки, снабженную лазерным осветителем, формирующем на поверхности объекта структурированную подсветку. Используя цифровое изображение объекта и спроецированное на него изображение лазерных пятен, становится возможным восстановление поверхности, и в случае выявления несплошности проводится измерение ее формы. Подобная система позволит контролировать форму труднодоступных деталей на предмет наличия дефектов без проведения их демонтажа и разбора. Применение системы позволяет сократить время обследования, снижает риски возникновения неисправностей при эксплуатации ответственного оборудования в различных секторах экономики. С помощью данной системы можно как проводить эксплуатацион-



ный контроль, так и использовать ее при продлении ресурса и сборке сложного технологического оборудования.

Доклад Д.Д. Хохлова, сделанный в соавторстве с А.М. Перфиловым (АО «НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко»), был посвящен эндоскопическим методам получения информации о пространственно-спектральных свойствах труднодоступных объектов. Использование информации о спектральных свойствах объекта (а именно, спектров поглощения, флуоресценции или комбинационного рассеяния вещества объекта) позволяет повысить эффективность эндоскопического обследования. Для решения задачи спектрального анализа излучения, соответствующего разным пространственным точкам объекта, может быть выполнена выборка спектральных интервалов с заданным шагом по длине волны и регистрация серии спектральных изображений, соответствующих этим интервалам. При этом спектральная селекция осуществляется за счет использования нескольких узкополосных фиксированных либо электронно-управляемых перестраиваемых спектральных

фильтров. В докладе описаны различные типы современных спектральных эндоскопических приборов, а также проведены их сравнение и оценка перспектив применения в технике и медицине.

Представленные доклады отражают основные тренды в развитии методов и аппаратуры оптического контроля: миниатюризация компонентной базы, комплексирование различных методов, широкое применение современных вычислительных методов и нейросетевых алгоритмов принятия решений. Доклады и проведенная дискуссия еще раз убеждают в том, что современный оптический контроль находится на стыке достижений фундаментальной науки и применения передовых информационных технологий и элементной базы.

Участники секции констатировали необходимость регулярного проведения секции «Оптический контроль» в рамках Всероссийской научно-технической конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике.

*Отчет подготовил  
А.С. Мачихин*

## СЕКЦИЯ № 10. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

### Руководители:

**АБРАМОВА Елена Вячеславовна**,  
д-р техн. наук, ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н. Э. Баумана»,  
Москва

**БУДАДИН Олег Николаевич**,  
д-р техн. наук, АО АО «ЦНИИСМ», г. Хотьково

Заседание 10-й секции «Неразрушающий контроль композиционных материалов (КМ)» было проведено 5 марта 2020 г. Программа включала 15 докладов, из них 14 были доложены авторами.

Заседание секции прошло с успехом, слушатели активно участвовали в обсуждении представленных результатов. Интерес представляли различные подходы к диагностике схожих объектов, классические и новые технологии диагностики конструкций из КМ. Были рассмотрены задачи: создания и идентификации дефектов, в том числе малоразмерных; разработки технологий НК различными методами; оценки влияния на качество объектов различного типа воздействующих нагрузок; определения предельного ресурса эксплуатации на основе результатов дефектоскопии.



О.Н. Будадин

Решение задач создания новых материалов, обладающих характеристиками, необходимыми для применения их в конструкциях, работающих в сложных условиях эксплуатации (высокие, низкие температуры, направленные сложные нагрузки вплоть до разрушения, наличие остаточных напряжений, связанных с несовершенствами технологий изготовления изделий и т.д.), требует разработки диагностических средств, предоставляющих такую информацию о контролируемом объекте, которая позволит прогнозировать его свойства и влиять на них в сторону совершенствования и обеспечения требуемых параметров.

Особое место с точки зрения технической диагностики занимают конструкции из композиционных материалов в силу сложности их технологического исполнения, анизотропности характеристик, разнообразия пространственных форм. Поэтому зачастую для качественного анализа параметров изделий из КМ применяется комплексный контроль, включающий несколько методов НК.

Этой теме был посвящен доклад А.А. Курятина, Д.Ю. Руса-



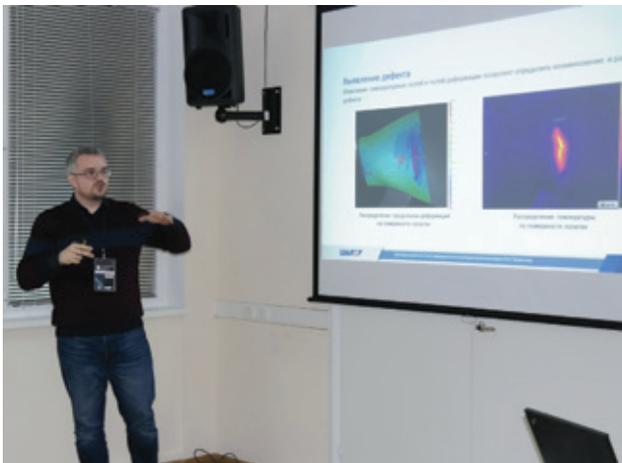
Е.В. Абрамова

кова, В.А. Чернушина «Идентификация типа дефекта при неразрушающем контроле конструкций из полимерных композиционных материалов». Авторы показали, что одной из наиболее сложных задач неразрушающего контроля конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) является идентификация типа обнаруженного дефекта: непроклей, расслоение, инородное включение, подмятие сотового заполнителя, пористость в материале и т.д. В различных типах конструкций (монокристаллических, многослойных с различными заполнителями, подкрепленных и др.) при использовании одного метода НК может возникать неясность в идентификации дефекта. На примере применения различных методов НК (ультразвуковой эхоимпульсный и теневой; рентгеновский, низкочастотный акустический импедансный и свободных колебаний, тепловой) рассмотрены их преимущества и недостатки для проведения дефектоскопии как монокристаллических, так и многослойных конструкций.

К теме выявления специфических дефектов, а вернее, малоразмерных металлических вклю-

чений, случайно попавших в структуру композиционного материала в производственных условиях, можно отнести объединенный по двум работам доклад А.О. Кузнецова «Методы и средства распознавания малоразмерных металлических включений (частиц) в материалах с малой электропроводностью (анализ современного состояния)» и «Разработка технологии и средств обнаружения металлических включений в композитном материале». На основе полученных результатов исследований разработано устройство с использованием вихретокового метода, способное обнаруживать малоразмерные металлические включения с размерами от 0,1–0,2 до 15 мм на глубине до 30 мм в полимерном композитном материале с погрешностью менее 10 %, что повышает качество конструкций из ПКМ за счет своевременного и достоверного обнаружения местоположения металлических включений.

Проблема создания искусственных дефектов в КМ, по которым возможна отработка методов НК, весьма существенна, так как они лишь в каком-то приближении имитируют естественные дефекты. Вариант решения этой задачи предложен в докладе «Теоретическое и практическое обоснование достоверности метода высокоточной имитации дефектов занижением сотового заполнителя в многослойных сотовых конструкциях из полимерных композиционных материалов» (авторы Д.Ю. Русаков, В.А. Чернушин, А.Н. Шелковой). Применение разработанного авторами метода имитации дефекта непроклея (так называемый *fib-shorting*-метод) в отличие от имеющихся аналогов позволяет имитировать дефекты со строго заданной площадью и конфигурацией. Разработанный метод показывает высокие результаты достоверности и воспроизводимости имитаторов де-



Д.В. Матюхин

фектов. Эффективность его применения доказана для настройки дефектоскопов, реализующих импедансный, тепловой, теневой ультразвуковой методы, а также метод свободных колебаний.

Следующей большой темой, представляющей значительный научный и практический интерес, было исследование изделий из КМ в условиях воздействия на них силовых и ударных воздействий.

В докладе А.Д. Богомоловой «Оценка влияния ударного повреждения на характеристику циклической прочности образцов, изготовленных из полимерных композиционных материалов. Анализ дефектоскопии образцов после ударного повреждения» экспериментальные исследования заключаются в определении площади внутреннего расслоения образцов с предварительно нанесенным ударным повреждением и изучении влияния площади внутреннего расслоения на циклическую прочность. Результатом дефектоскопии является изображение отсканированного образца из углепластика в программе AutoScan. При анализе изображения определяются местоположение и границы расслоений. Дефекты отображаются на графике с указанием времени и амплитуды отраженного сигнала.

О.Н. Будадин с соавторами А.Ф. Разиным, В.А. Анисковичем, Е.В. Абрамовой и С.А. Козельской представили доклад «Новые подходы к диагностике качества конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях силового и ударного воздействия по анализу температурных полей». В данной работе рассмотрены возможности диагностики качества конструкций, функционирующих при наиболее распространенных нагрузках: квазистатических силовых нагрузках и динамических ударных нагрузках по анализу динамических температурных полей. Методы диагностики основаны на измерении косвенных проявлений разрушений, происходящих на структурном уровне материала.



О.Н. Будадин

Микрповреждения материала обычно не являются недопустимыми при эксплуатации конструкции, известно, что их начальное образование происходит при уровнях нагрузки, в несколько раз меньших предельных. С другой стороны, накопление микрповреждений сопровождается выделением энергии (акустической, тепловой, электромагнитной), что позволяет обнаружить зоны, в которых эти повреждения накапливаются наиболее интенсивно. Это дает возможность, во-первых, определять места концентрации напряжений, потенциально опасные области, во-вторых, определять потенциальные места разрушения изделий, не доводя сами изделия до разрушения. Методом НК, оптимально решающим задачу диагностики накопления микрповреждений, является тепловой. Проведенные исследования позволили авторам разработать математические модели, описывающие процесс образования внутренних тепловых источников в полимерном композиционном материале в процессе его силового и ударного нагружения. Разработаны и внедрены методики и программно-аппаратные средства компьютерного теплового контроля и диагностики технического состояния сложных пространственных и броневого конструкций из ПКМ на основе регистрации информации о динамических температурных полях, обусловленных наличием концентраторов напряжений (образованием микроразрушений), со специализированными алгоритмами обработки информации.

Продолжением темы наличия динамических нагрузок при функционировании изделий из композитов был доклад авторов Б.И. Шагдырова и А.О. Чулкова «Исследование влияния ударных воздействий на теплофизические характеристики композиционных материалов методом активной инфракрасной термографии», в котором были рассмотрены результаты анализа изменения теплофи-

зических характеристик, а именно температуропроводности в дефектных областях образцов из композиционных материалов, таких как кевлар, карбон, кевлар-карбон. Пластины подвергали ударным нагрузкам с энергией однократного удара до 5 Дж. Лучшую устойчивость к ударным воздействиям показали комбинированные образцы из слоев кевлара и карбона.

Вообще применению теплового метода для диагностики изделий из ПКМ была посвящена примерно треть докладов секции.

Многообразие дефектов в композитных конструкциях (КК) требует для их обнаружения и идентификации использования различных технологий теплового контроля, каждая из которых решает определенный комплекс задач. Например, в настоящее время актуальны задачи идентификации малоразмерных дефектов типа нарушения сплошности по глубине их залегания в материале (определения глубины залегания дефектов) в сложных пространственных конструкциях, задачи обнаружения малоразмерных «сомкнутых» дефектов, имеющих в нормальном состоянии практически нулевое раскрытие, проявляющихся в процессе нагружения конструкций силовыми нагрузками и не позволяющих обнаруживать себя традиционными технологиями и т.п.

В докладе «Технология комплексной тепловой дефектометрии сложных пространственных композитных конструкций в условиях эксплуатации» автора С.О. Козельской рассмотрены вопросы разработки данной темы для нахождения малоразмерных дефектов типа нарушения сплошности композитных конструкций сложной формы, включающие ультразвуковую термо-томографию и электро-силовую термографию. Предложенная технология основана на выявлении внутренних дефектов как источников теплоты, вызванной применением дополнительных источников стимуляции. При этом идентифицируются дефекты, которые ранее существовавшими методами практически не определялись, например дефекты малых размеров, сомкнутые трещины, микротрещины и т.п., с определением их местоположения в материале. Показано, что погрешность определения глубины их залегания в материале при использовании предлагаемой комплексной технологии не превышает 10 – 15 %, что вполне приемлемо для практики.

Авторы Д.В. Матюхин, С.В. Воробьев в своей работе «Применение теплового и визуального контроля при усталостных испытаниях изделий, изготовленных из полимерного композиционного материала» предложили технологию применения теплового и визуального контроля в испытаниях на многоцикловую усталость различных образцов из полимерного КМ, моделей и полноразмерных деталей авиа-

ционного двигателя из них. Разработана техника измерений при циклическом нагружении с помощью современных оптических систем, позволяющая определять собственные формы колебаний, распределение деформаций и температур на поверхности объекта исследований. Разработанная технология использована для обнаружения технологических дефектов в полноразмерных деталях при испытаниях на электродинамических вибростендах.

Работа секции показала, что акустические методы продолжают активно применяться для диагностики композиционных материалов. В развитие этого направления авторы А.А. Курятин и Г.П. Стариковский представили доклад «Неразрушающий контроль многослойных и подкрепленных конструкций из полимерных композиционных материалов ультразвуковым эхоимпульсным методом». В нем предложен альтернативный высокочувствительный способ НК многослойных и подкрепленных конструкций из ПКМ ультразвуковым эхоимпульсным методом, позволяющий не только выявлять, но и одновременно определять тип обнаруженного дефекта – расслоение в обшивке или непрочности. Также данным способом можно проводить одновременный поиск дефектов в материале листа и дефектов в клеевом слое, реализуя процесс контроля при одном акте сканирования поверхности одного из соединяемых листов в соединении лист–лист либо поверхности листа в соединении лист–заполнитель.

Для исследования влияния ударных воздействий на углеродные материалы кроме теплового метода с успехом применяется акустическая микроскопия, что показано в докладе «Импульсная акустическая микроскопия для объемной визуализации и оценки внутренних повреждений при ударных нагрузках армированных углепластиков аэрокосмического назначения», который представили авторы Е.С. Мороков, В.М. Левин, А.В. Чернов, Т.Б. Рыжова, А.Н. Шаныгин. В данной работе показаны результаты использования высокочастотной акустической микроскопии для визуализации и анализа механизмов разрушения армированных углепластиков под действием ударных нагрузок. Исследования проводились с помощью импульсного акустического микроскопа, разработанного и созданного в Институте биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук. Визуализация внутренней микроструктуры выполнялась до и после ударных испытаний с применением акустических линз на рабочей частоте 50 и 100 МГц. Идентифицируются основные типы разрушений углепластиков: образование межслоевых расслоений, растрескивание матрицы, разрыв армирующих волокон, которые на дефектограммах изображаются градиентами интенсивности цвета в серой палитре.

Влияние наличия микроразрушений на прочностные характеристики углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ), нашедших широкое применение в аэрокосмической технике, рассмотрено в докладе «Возможности акустического теневого метода для технической диагностики углерод-углеродных композиционных материалов на основе тканно-прошивного каркаса» (авторы: А.И. Смирнов, А.А. Носков, В.М. Блинов). Детали из УУКМ используются в качестве теплозащиты сопловых блоков ракетных двигателей, носовых обтекателей ракет и летательных аппаратов. В работе рассматривается УУКМ на основе тканно-прошивного каркаса (ТПК) из ткани типа УТ-900 (двухнаправленного переплетения) и комбинированной коксовой и пироуглеродной матрицы. Авторы считают, что основными физико-химическими характеристиками, определяющими качество УУКМ, являются кажущаяся плотность и открытая пористость, для исследования они применили акустический теневой метод НК с помощью построения корреляционных зависимостей ослабления и скорости распространения ультразвуковых колебаний с указанными характеристиками УУКМ, при этом при диагностике предела прочности композиционного материала оптимальным информативным параметром является ослабление УЗК.

Для изучения механизмов разрушения армированных композитов и конструкций из них в докладе «Определение деформаций в композитных материалах методом корреляции ультразвуковых изображений» предложено использование технологий ультразвуковой визуализации высокого разрешения. Авторы исследований С.А. Титов, В.М. Левин, Ю.С. Петронюк, Е.С. Мороков предложили метод измерения деформации образца при его механических испытаниях путем ультразвуковой визуализации изменений структуры под действием приложенной силы. Разработан алгоритм обработки акустических изображений, позволяющий обнаруживать и количественно характеризовать смещение структурных элементов композитной среды при разных нагрузках. Показано на образцах, что предложенный метод может быть использован для измерения продольной и поперечной деформации композитных материалов.

Направления дальнейшего совершенствования характеристик композиционных материалов в области защиты вооружения, военной и специальной техники показал В.А. Анискович в своей работе «Современные тенденции развития керамики-композитной брони», которые включают задачи создания научно-технического задела для развития технологий производства новых бронематериалов с улучшенными характеристиками.

Применение методов НК в конечном итоге необходимо для диагностики технического состоя-



ния объектов и прогностике сохранения их заданных эксплуатационных свойств во времени. Исследованию этой темы был посвящен доклад О.Н. Будагина с соавторами С.О. Козельской и А.Н. Рыковым «Новый подход к проблеме оценки предельного ресурса эксплуатации конструкций из полимерных композиционных материалов на основе результатов неразрушающего контроля». В нем предложено оценку эксплуатационной безопасности материалов и деталей сложной конструкции проводить на основе методов искусственного интеллекта на базе искусственных нейронных сетей и многокритериального комплексного неразрушающего контроля с использованием специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа текущих характеристик объектов диагностики и прогнозирования их остаточного ресурса в условиях внешних воздействий.

Представленные доклады отражают современное, на уровне мировых стандартов, состояние развития методов диагностики конструкций из КМ, имеющих очень широкие перспективы применения в различных отраслях промышленности, для обеспечения безопасности нашей страны и в аэрокосмических направлениях.

Вторая часть названия конференции, связанная с безопасностью, неожиданно получила развитие в современных условиях, когда весь мир охватила пандемия коронавируса. Большим спросом стали пользоваться тепловизионные приборы и ИК-термометры, позволяющие отследить ненавязчивым динамическим тепловым методом состояние здоровья больших масс людей путем измерения температуры в реальном времени их движения и выявить людей с повышенной температурой. Попутно такие оперативные обследования позволяют выявлять и многие другие заболевания. К сожалению, зачастую измерительные процедуры осуществляются некорректно, не учитывается влияние окружающей среды на открытые участки тела человека. Это приводит к неизбежным ошибкам в результатах, что в очередной раз говорит о том, что к любым измерениям нужно подходить профессионально.

*Отчет подготовила  
Е.В. Абрамова*

## СЕКЦИЯ № 11. ТЕРАГЕРЦОВЫЙ И РАДИОВОЛНОВОЙ КОНТРОЛЬ

**Руководитель:**

**ШУБОЧКИН Андрей Евгеньевич,**

д-р техн. наук, ЗАО «НИИИИИ МНПО «Спектр», Москва

В рамках 11-й секции «Терагерцовый и радиоволновой контроль» специалистами Научно-технического центра уникального приборостроения РАН в содружестве с МГУ им. М.В. Ломоносова, Новосибирским государственным университетом и Институтом ядерной физики им. Г.И. Будкера были представлены работы, освещающие современное состояние и перспективы развития методов плазмонной интерферометрии и структуроскопии терагерцового (ТГц) и инфракрасного (ИК) диапазонов.

В работе А.К. Никитина, В.В. Герасимова и Б.А. Князева показано, что при использовании такой разновидности электромагнитных волн, как



*А.Е. Шубочкин*



*Выступает О.В. Хитров*



поверхностные плазмон-поляритоны (ППП) терагерцового диапазона, контроль состояния поверхности и определение наличия на ней неоднородностей возможен на металлических изделиях большой площади с высокой чувствительностью. Авторами представлена схема устройства, позволяющего обнаруживать неоднородности размером в сотую долю длины волны, т.е.  $\sim 1$  мкм. Впервые были озвучены результаты реализации загоризонтной локации не в радиодиапазоне, а в терагерцовом диапазоне. Загоризонтные терагерцовые ППП-локаторы могут найти применение в оптико-механической промышленности для локализации объектов на выпуклой механической поверхности с ограниченным доступом к ней; в авиации для обнаружения обледенения; в инженерии и научных исследованиях для зондирования объектов, находящихся в зоне воздействия агрессивных газовых сред или ионизирующего излучения.

О.В. Хитров и А.К. Никитин предложили схему интерферометра Майкельсона с использованием полиамидной пленки вместо уголкового зеркала, позволяющего определить обе части комплексного показателя преломления терагерцового ППП (по периоду интерферограммы и по изменению ее видимости, контраста) при контроле плоской поверхности металлических изделий. Данная схема позволяет снизить интенсивность порождаемых при делении пучка терагерцовых ППП паразитных объемных волн.

Доклад Н.В. Поликарповой и А.К. Никитина был посвящен изучению акустических, фотоупругих и оптических свойств монокристаллических сред в терагерцовом диапазоне волн (от 40 до 100 мкм) для определения зависимости характери-

стик устройств, использующих акустооптический (АО) эффект, состоящий в дифракции электромагнитного излучения на ультразвуке. Показано, что при использовании лазера на свободных электронах (ЛСЭ) с помощью ячейки Голя и синхронного детектирования можно уверенно регистрировать дифрагированное излучение монокристаллических сред: антимонида алюминия AlSb, германия Ge, арсенида галлия GaAs, кремния Si и фосфида галлия GaP. Полученные авторами результаты позволяют выбрать оптимальную среду АО взаимодействия для создания модуляторов и фильтров ИК- и терагерцового излучения, а также определить размеры кристалла, необходимые для требуемых характеристик АО-устройств.

Работа И.Ш. Хасанова посвящена усовершенствованию метода пассивной плазмон-поляритонной абсорбации ИК-структуроскопии тонкостенных объектов. Автор показывает, что в случаях нарушения трансляционной симметрии на металлической поверхности (таких как край направляющей ППП-поверхности) поверхностные электромагнитные волны могут срывать в объемную волну, что в свою очередь позволяет регистрировать ее в дальней волновой зоне. Используя метод Зоммерфельда–Малюжинса, была разработана аналитическая модель, с помощью которой можно рассчитать диаграмму направленности объемного излучения в зависимости от длины волны излучения. Данная модель дает возможность обобщить результат для случая широкополосных ППП и показать, что грань металлического тела является узконаправленным источником  $p$ -поляризованного излучения терагерцового ППП.

На сегодняшний день многопиксельные камеры и детекторы, работающие в терагерцовом и дальнем ИК-диапазонах спектра, достаточно сложны и дороги. Авторы Л.А. Зыкова и И.Ш. Хасанов предлагают использовать метод фантомного видения (ФВ) в плазмон-поляритонной микроскопии терагерцового диапазона. Метод микроскопии ППП обладает сверхвысоким вертикальным разрешением за счет концентрации энергии эванесцентной волны вблизи поверхности при невысоком латеральном разрешении, обусловленным переизлучением поверхностной электромагнитной волны, возбужденной падающим излучением. Для реализации предложенного метода микроскопии ППП предложено использовать поверхности полупроводников с плазменной частотой намного больше, чем частота зондирующего сигнала, а в качестве приемника применять однопиксельные приемники, такие как ячейка Голя или детектор на горячих электронах. Получение изображения методом ФВ позволяет не пользоваться механическим сканированием и повысить латеральное раз-

решение изображений вследствие отсечки некогерентных с модулированным случайными масками (спекл-картинами) светом случайных составляющих отраженного излучения, влияния фазовых шумов.

### Заключение

Долгое время терагерцовый диапазон электромагнитных волн оставался практически неосвоенным с точки зрения спектроскопических исследований и практического применения. Последнее десятилетие принесло значительные подвижки в данной области, связанные с развитием малогабаритных источников терагерцового излучения достаточной мощности; разработкой новых материалов, прозрачных в терагерцовом диапазоне; созданием матричных и высокочувствительных детекторов. Лаборатории терагерцовой структуроскопии создаются во многих ведущих институтах мира и России, обеспечивая перспективы развития направления. Не являясь ионизирующим излучением и будучи неинвазивным, данный диапазон волн безопасен для органических тканей и открывает новые горизонты в медицине. Терагерцовые технологии объективно имеют значительный потенциал в областях дистанционного зондирования и определении опасных материалов. Характеристические признаки различных конденсированных сред (твердые тела, жидкости, биомедицинские ткани, водные растворы и смеси, химические соединения различной агрегации) попадают именно в терагерцовый диапазон и используются в качестве селективной диагностики при терагерцовой структуроскопии. Спектральные свойства терагерцовой структуроскопии определяют перспективность практической реализации в области безопасности, биомедицинских технологий, фармацевтике, нанотехнологиях, микро- и наноэлектронике, контроле продуктов питания, мониторинге климата, астрономии, космической связи и неразрушающем контроле различных материалов.

*Отчет подготовил  
А.Е. Шубочкин*

Материалы XXII Всероссийской научно-технической конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике изданы отдельным изданием:

**XXII Всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике «Трансформация неразрушающего контроля и технической диагностики в эпоху цифровизации. Обеспечение безопасности общества в изменяющемся мире»: сб. тр. Москва, 3 – 5 марта 2020 г. – М.: Издательский дом «Спектр», 2020. – 358 с.** ■