

Секция «Неразрушающий контроль композиционных материалов».

Руководители: Абрамова Е.В., Будадин О.Н.

XXII Всероссийская научно-технической конференции по НК и ТД прошла с 3 по 5 марта 2020 года в Москве в Центральном выставочном комплексе Экспоцентр. Характерно ее название: «Трансформация неразрушающего контроля и технической диагностики в эпоху цифровизации. Обеспечение безопасности общества в изменяющемся мире». Таким образом, задачей диагностики в настоящее время является не просто выявление дефектов в конструкциях, а, в конечном итоге, прогностика сроков безаварийного функционирования объектов на основе тщательного изучения их поведения под эксплуатационными нагрузками при наличии/отсутствии тех или иных дефектов, оцениваемых по степени опасности. При этом выбор методов неразрушающего контроля (НК) опирается как раз на их способность выявлять «опасные» дефекты и пропускать несущественные.

Секция 10 «Неразрушающий контроль композиционных материалов (КМ)» была проведена 5 марта 2020 года. Программа включала 15 докладов, из них 14 были доложены авторами.

Секция прошла 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 т.ч. малоразмерных; разработки технологий НК различными методами; оценки влияния на качество объектов различного типа воздействующих нагрузок; определения предельного ресурса эксплуатации на основе результатов дефектоскопии.

Решение задач создания новых материалов, обладающих характеристиками, которые позволяют применять 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, позволяющих получать 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 (КМ) 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 Курятин А.А., Русакова Д.Ю., Чернушина В.А. «Идентификация типа дефекта при неразрушающем контроле конструкций из полимерных композиционных материалов». Авторы показали, что одной из наиболее сложных задач неразрушающего контроля (НК) 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 (монолитных, многослойных с различными заполнителями, подкреплённых и др.) при использовании одного метода НК может возникать неясность в идентификации дефекта. На примере применения различных методов НК (ультразвуковой эхо-импульсный и теневой; рентгеновский, низкочастотный акустический импедансный и

свободных колебаний, тепловой) рассмотрены их преимущества и недостатки для проведения дефектоскопии как монолитных, так и многослойных конструкций.

К теме выявления специфических дефектов, а вернее малоразмерных металлических включений, случайно попавших в структуру композиционного материала в производственных условиях, можно отнести объединенный по двум работам доклад Кузнецова А.О. «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 размерами от $0,1 \div 0,2$ 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 Русаков Д.Ю., Чернушин В.А., Шелковой А.Н.). Применение разработанного авторами метода имитации дефекта непроклея (так называемый «rib-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 дефектов. Эффективность его применения доказана для настройки дефектоскопов, реализующих импедансный, тепловой, теневой ультразвуковой, 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, представленные в данной работе, заключаются в определении площади внутреннего расслоения образцов, с предварительно нанесенным ударным повреждением, и изучение влияние площади внутреннего расслоения на циклическую прочность. Результатом дефектоскопии является изображение отсканированного образца из углепластика в программе AutoScan. При анализе изображения определяется местоположения и границы расслоений. Дефекты отображаются на графике с указанием времени и амплитуды отраженного сигнала.

Будадин О.Н. с соавторами Разиным А.Ф., Анисковичем В.А., Абрамовой Е.В. и Козельской С.А. 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.

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 броневых 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 Шагдырова Б.И. и Чулкова А.О. «Исследование влияния ударных воздействий на теплофизические характеристики композиционных материалов методом активной инфракрасной термографии», в котором рассмотрены результаты анализа изменения теплофизических характеристик, а именно, температуропроводности в дефектных областях образцов из композиционных материалов, таких как кевлар, карбон, кевлар-карбон. Пластины подвергались ударным нагрузкам с энергией однократного удара до 5 Дж. Получено, что лучшую устойчивость к ударным воздействиям показали комбинированные образцы из слоев кевлара и карбона.

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

Многообразие дефектов в композитных конструкциях (КК) требует для их обнаружения и идентификации 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 позволяющие обнаруживать себя традиционными технологиями и т.п.

В докладе «Технология комплексной тепловой дефектометрии сложных пространственных композитных конструкций в условиях эксплуатации» автора Козельской С.О. рассмотрены вопросы разработки данной темы для нахождения малоразмерных дефектов типа нарушения сплошности композитных конструкций сложной формы, включающие ультразвуковую термо-томографию и электросиловую термографию. Предложенная технология основана на выявлении внутренних дефектов как источников

тепла, вызванного применением дополнительных источников стимуляции. При этом идентифицируются дефекты, которые ранее существующими методами практически не определялись, например, дефекты малых размеров, сомкнутые трещины, микротрещины и т.п. с определением их местоположение 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 рассмотрели «Применение теплового и визуального контроля при усталостных испытаниях изделий, изготовленных из полимерного композиционного материала». Предложена технология применения теплового и визуального контроля в испытаниях на многоцикловую усталость различных образцов из полимерного КМ, моделей и полноразмерных деталей авиационного 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 Курятин А.А. и Стариковский Г.П. представили доклад «Неразрушающий контроль многослойных и подкрепленных конструкций из полимерных композиционных материалов ультразвуковым эхо-импульсным методом». В нем предложен альтернативный высокочувствительный способ НК многослойных и подкрепленных конструкций из ПКМ ультразвуковым эхо-импульсным методом, позволяющий не только выявлять, но и одновременно определять тип обнаруженного дефекта – расслоение в обшивке или непрочной. Также данный способ позволяет производить 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 – наполнитель».

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 применения 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 имени Н.М. Эмануэля Российской академии наук. Визуализация внутренней микроструктуры проводилась 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 градициями 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 ткано-прошивного каркаса» (авторы: Смирнов А.И., Носков А.А., Блинов В.М.). Детали из УУКМ применяются в качестве теплозащиты сопловых блоков ракетных двигателей, носовых обтекателей ракет и летательных аппаратов. В работе рассматривается УУКМ на основе ткано-прошивного каркаса (ТПК) из ткани типа УТ-900 (двунаправленного 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 при помощи 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: Титов С.А., Левин В.М., Петронюк Ю.С., Мороков Е.С. 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 своей работе Анискович В.А. «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 состояния объектов и прогнозировке сохранения их заданных эксплуатационных свойств во времени. Исследованию этой темы был посвящен доклад Будадина О.Н. с соавторами Козельской С.О. и Рыковым А.Н. «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 большие перспективы применения в различных отраслях промышленности, обеспечения безопасности нашей страны и аэрокосмических направлениях.

P.S. 2-я 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 не корректно, 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.

Литература

Сборник трудов, 22 Всероссийская научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностики, 2020г. 3-5 марта, Москва, Центральный выставочный комплекс Экспоцентр.