

Технологии выявления повреждений керамических композиционных материалов на этапе производства и в процессе эксплуатации

И. Н. Новицкий

*Московский авиационный институт*

*(национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия*

*В статье приводится обзор технологий выявления повреждений материалов на примере керамических композиционных материалов. В данной работе выполнен обобщенный обзор характеристик композиционных керамических материалов, рассмотрены характеристики конкретных предложений и рассмотрены перспективы их применения. Уделено внимание вопросам, как минимизации, так и предотвращению возникновения последствий проявления технических рисков в условиях промышленных предприятий. Выполнен обзор, ориентированный на основные методы неразрушающего контроля характеристик и структуры волокон детали, как на этапе производства, так и в процессе эксплуатации.*

*Ключевые слова: технологии, композиционные материалы, производство, керамические композиты, технический риск, подготовка производства*

Несмотря на все достоинства керамических композиционных материалов, в связи с их хрупкостью и пористой структурой [1], важным аспектом рассмотрения этого материала является диагностика повреждений различными методами неразрушающего контроля. Явление самовосстановления ставит задачу ещё более остро, т.к. без диагностического анализа структуры нельзя быть уверенным в ресурсе работы детали. Кроме этого, несомненно необходимо проведение работ, имея дело, в том числе и с керамическими композиционными материалами, в строгом соответствии с самыми высокими требованиями по обеспечению качества [2] выпускаемой продукции.

В работе рассматриваются особенности реализации деталей, входящих в состав изделий с учётом их взаимодействия при эксплуатации и в зависимости от эксплуатационных требований, предъявляемых к ним, что соответственно диктует необходимость реализации востребованной их обработки или доработки [3-5], если речь идёт о процедурах восстановительных и ремонте.

Так, было проведено исследование, задачей которого стоял анализ пригодности различных методов неразрушающего контроля к диагностике керамических композиционных материалов в полевых условиях. В исследовании были рассмотрены ультразвуковой, тонографический и сдвигографический методы диагностики. Согласно результатам этого исследования все используемые методы (ультразвуковой, тонографический и сдвигографический) выявили ударные повреждения в композитах с керамической матрицей. Однако, только ультразвуковой и термографический методы были способны охарактеризовать степень повреждения.

Ультразвуковой контроль с использованием импульсного эха во временной области был признан неэффективным из-за обширного некогерентного рассеяния, вызванного большим количеством пустот, присутствующих в материалах керамических композиционных материалов.

Ультразвуковой контроль с помощью импульсного эхо-сигнала в частотной области был эффективным, как традиционным, так и лазерным методом на основе лазерного излучения. Использование соответствующей краски повысило эффективность ультразвукового контроля с использованием лазера.

Импульсная инфракрасная термография была чрезвычайно быстрой и эффективной для определения характеристик дефектов.

Сдвигография оказалась неспособной охарактеризовать степень повреждения, хотя наличие повреждений можно было обнаружить.

Применимость каждого из методов обследования представляется ограниченной. Среди часто применимых и наиболее востребованных, в частности, могут быть отмечены следующие: обычный импульсный эхо- и сквозной ультразвуковой контроль, ультразвуковой контроль с использованием лазера, ультразвуковой контроль с использованием гибкого бланка, импульсная инфракрасная тонография и сдвигография.

Для более детального изучения особенностей применения различных методов контроля был применен анализ данных акустической эмиссии на основе формы волны. Этот анализ сочетает точное определение местоположения события и сравнение зарегистрированных энергий, чтобы выбрать события акустической эмиссии, происходящие от повреждения, и охарактеризовать эффекты распространения на зарегистрированных формах волны.

Энергетический подход подтверждает, что события акустической эмиссии происходят от повреждения, что обеспечивает надежные данные для последующего анализа, такого как идентификация режима повреждения. Подход требует только двух удаленных датчиков и поэтому применим, когда геометрия образца или условия диагностики не позволяют разместить датчик в центре измерительной секции. Он был продемонстрирован с использованием искусственных источников, а затем применен на двух различных композитных системах.

Вторым преимуществом энергетического подхода является возможность характеризовать затухание энергии на месте и его зависимость от частоты и прогрессии повреждения, используя только события акустической эмиссии, зарегистрированные во время диагностики. Результаты, полученные в композитах, находятся в отличном согласии с ультразвуковыми измерениями.

Подход на основе энергии теперь позволяет более точно описать свойства источников акустической эмиссии с учетом эффектов распространения. Определение места возникновения акустической эмиссии показало, что определение местоположения события акустической эмиссии превосходит, так называемый, метод пересечения первого порога, будучи менее зависимым от качества связи материала и датчика. Преобладающее большинство событий были локализованы с незначительным отклонением от ручного определения. Более того, при использовании рассматриваемого метода, для отбора событий, происходящих из изме-

рительной секции, обеспечило точный отбор, максимизируя количество отобранных истинных событий и ограничение добавления в анализ ложных событий.

Также проводились исследования по диагностике состояния композита с помощью его электрического сопротивления. Большинство повреждений в керамических матричных композитах, подвергающихся монотонным растягивающим нагрузкам, происходит в виде распределенных трещин в матрице. Эти трещины возникают вблизи концентраций напряжения, таких как волокна или крупные поры матрицы, и продолжают накапливаться с увеличением напряжения, пока не достигается насыщение матрицы трещинами. Такие повреждения трудно обнаружить с помощью обычных методов неразрушающей оценки (ультразвук при погружении, рентген и т.д.).

Мониторинг изменения электрического сопротивления образца обеспечивает косвенный подход для мониторинга плотности трещин в матрице. Композиты, армированные волокнами, с матрицей, были нагружены на растяжение при комнатной температуре. Результаты показали увеличение сопротивления более чем на несколько порядков до разрушения, которое может быть обнаружено как на месте, так и после повреждения.

Также была определена зависимость между изменением сопротивления и плотностью трещин в матрице.

Помимо возможностей непосредственного использования, как постоянного, так и переменного тока, в этой сфере есть перспективы применения вихревых токов. Применения вихревых токов, прежде всего, может опираться на обширный и длительный опыт, накопленный при проведении диагностики композитов из чистого углеродного волокна с использованием вихревых токов. Данный метод диагностики был оценен на образцах керамических композиционных материалов на различных этапах производственного процесса.

При использовании вихретокового метода поверхность испытуемого объекта сканируется специальным зондом. При этом небольшое и очень локализованное электромагнитное поле связывается с материалом и регистрируются изменения электрических и емкостных свойств материала.

Таким образом, объект исследования может быть исследован на глубину до нескольких миллиметров под поверхностью. Сканирование может проводиться на плоских образцах с помощью простого двумерного сканирующего стола или на компонентах свободной формы (в промышленных условиях) с помощью промышленного робота. Также стоит акцентировать внимание на том, что любые изменения, возникающие в процессе создания изделий и входящих в них деталей сопряжены с пересмотром и возможным переопределением принятых ранее решений, что, в свою очередь, способно приводить к проявлению, так называемых, технических рисков [6-8] при конструкторско-технологической подготовке производства.

В данной работе было уделено внимание вопросам, как минимизации, так и предотвращению возникновения последствий проявления технических рисков в условиях промышленных предприятий [9-11].

В рамках выполненного исследования было установлено, что метод высокочастотных вихревых токов позволяет получить следующие характеристики материалов на основе керамических композиционных материалов:

- Ориентация отдельных слоев волокон;
- Локальное распределение плотности волокон;
- Включения воздуха (поры) или примесей (в зависимости от включенного материала);
- Надрезы, царапины и трещины;
- Местные изменения в однородности.

Эти результаты демонстрируют пригодность метода высокочастотных вихревых токов для использования в неразрушающем контроле качества керамических матричных композитов.

Керамические композиционные материалы являются перспективными композиционными материалами, обладают исключительными термической и химической стойкостями, низкой плотностью. Высокая стоимость материала, технологической оснастки для его обработки, а также низкий модуль упругости на сегодняшний день являются основными факторами, ограничивающими более интенсивные разработки в этой отрасли.

В данной работе выполнен общий обзор характеристик композиционных керамических материалов, рассмотрены характеристики конкретных предложений и рассмотрены перспективы их применения. Выполнен обзор, ориентированный на основные методы неразрушающего контроля характеристик и структуры волокна детали, как на этапе производства, так и в процессе эксплуатации.

#### Библиографический список

1. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 1 / под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина. 7-е изд., испр. – Москва : Инновационное машиностроение, 2023. 756 с.

2. Высоцкая, В. И. Анализ факторов, определяющих качество продукции авиационной промышленности / В. И. Высоцкая, С. Б. Маликов, Т. В. Токмакова // Авиационная промышленность. – 2021. – № 2. – С. 51–53.

3. Бойцов, А. Г. Воздействие электроэрозионного фрезерования на обработку деталей ГТД из титановых сплавов / А. Г. Бойцов, Т. В. Токмакова, В. И. Высоцкая, С. Б. Маликов // Авиационная промышленность. – 2019. – № 1. – С. 45–47.

4. Высоцкая, В. И. Влияние электрофизических методов обработки на свойства КМ на основе высокотемпературных карбидов с металлическими наполнителями / В. И. Высоцкая, С. Б. Маликов, Т. В. Токмакова // Авиационная промышленность. – 2018. – № 2. – С. 41–43.

5. Высоцкая, В.И. Влияние механической обработки на свойства КМ на основе высокотемпературных карбидов с металлическими наполнителями / В. И. Высоцкая, С. Б. Маликов, Т. В. Токмакова // Авиационная промышленность. – 2017. – № 4. – С. 42–45.

6. Юрин, В.Н. Анализ взаимосвязей информации конструкторских и технологических документов / В. Н. Юрин, С. Б. Маликов / Четвертый Международный аэрокосмический конгресс IAS-2003. Сборник тезисов. Посвящается 100-летию авиации. – Москва : СИП РИА, 2003. – С. 193–195.

7. Маликов, С. Б. Метод анализа технического риска при организации подготовки опытного производства деталей: дисс. ... канд. техн. наук. – Москва : МАТИ, 2012. – 195 с.

8. Юрин, В. Н. Менеджмент рисков параллельного выполнения работ при конструкторско-технологической подготовке опытного производства деталей авиадвигателей / В. Н. Юрин, С. Б. Маликов // Технология машиностроения. – 2012. – № 3. – С. 54–59.

9. Маликов, С. Б. Риски параллельного выполнения работ конструкторско-технологической подготовки опытного производства авиационных двигателей / С. Б. Маликов, В. Н. Юрин // Пятая Всероссийская научно-практическая конференция «Применение ИПИ-технологий в производстве». Труды конференции. – Москва : ИЦ «МАТИ»–РГТУ им. К.Э. Циолковского, 2007. – С. 117–118.

10. Юрин, В. Н. Исследование документооборота при проектировании приспособлений на двигателестроительном предприятии / В. Н. Юрин, С. Б. Маликов // Авиадвигатели XXI. II Международная научно-техническая конференция, 2005. – С. 330–331.

11. Юрин, В.Н. Оценка технического риска параллельного выполнения работ конструкторско-технологической подготовки производства деталей / В. Н. Юрин, С. Б. Маликов // Научно-технические технологии в машиностроении и авиадвигателестроении (ТМ–2012). Материалы четвертой международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию заслуженного деятеля науки и техники РФ, доктора технических наук, профессора Безъязычного Вячеслава Феоктистовича. В 2-х частях. Ч. II. – Рыбинск : РГАТУ им. П.А. Соловьёва, 2012. – С. 421–426.