



Центр научно-технической информации и библиотек  
– филиал ОАО «РЖД»

## Дифференцированное Обеспечение Руководства

---

75/2022

### Выявление дефектов в композитных деталях подвижного состава

В рамках европейской инициативы Shift2Rail Joint Undertaking (JU) осуществляется проект Gearbodies, основная цель которого – снижение стоимости технического обслуживания пассажирского подвижного состава. Для решения этой задачи идет разработка методов выявления дефектов компонентов подвижного состава, изготовленных из композитных материалов. На долю затрат на техническое обслуживание, по оценкам, приходится примерно 25-30% эксплуатационных расходов и до 20% стоимости жизненного цикла подвижного состава. Поэтому их сокращение имеет существенное значение для обеспечения конкурентоспособности железнодорожного транспорта. Финансирование проекта осуществляется по соглашению о гранте Shift2Rail JU № 101013296 с поддержкой от европейской исследовательской и инновационной программы Horizon 2000 и некоторых других участников инициативы.

Проект Gearbodies направлен на повышение эффективности обслуживания таких критически важных узлов подвижного состава, как тяговые редукторы и кузова. Использование композитных материалов, прежде всего пластика, армированного углеродным волокном (углепластика), и пластика, армированного стекловолокном, для изготовления кузовов пассажирских вагонов в последние годы расширилось, поскольку предоставляет ряд преимуществ, которые были невозможны при применении в качестве материала кузова алюминия или стали. Важнейшее из них – существенное уменьшение массы при сохранении или даже улучшении конструктивных характеристик. Кроме того, кузова из композитных материалов обладают меньшей электропроводностью и более высокой

стойкостью к коррозии, чем металлические.

Сложившаяся практика диагностирования кузовов вагонов обычно предусматривает контроль их состояния как снаружи, так и изнутри, что зачастую требует демонтажа внутреннего оборудования. Внедрение композитных материалов для кузовов вызывает необходимость разработки новых методов, основанных как на уже известных, так и на принципиально новых технологиях неразрушающего контроля.

В качестве первого шага при разработке и создании прототипа технологической платформы для автоматизированного диагностирования состояния кузовов подвижного состава из композитных материалов был проведен анализ потенциала применения инфракрасной термографии и ультразвукового контроля для выявления дефектов компонентов, выполненных из монолитного армированного углепластика, и сэндвич-панелей, состоящих из монолитного углепластика в качестве покрытия и наполнителя из пенопласта.

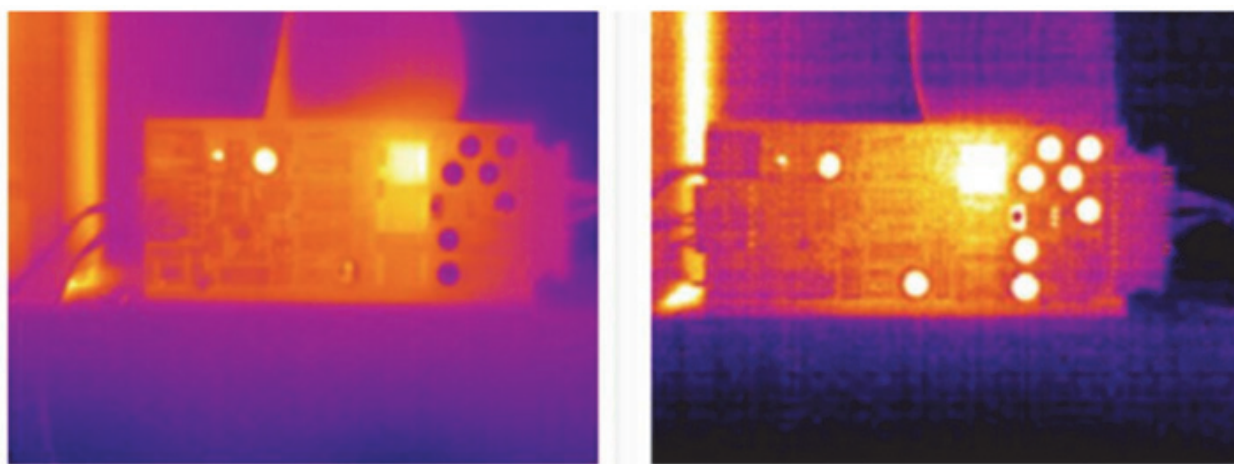
Эти методы неразрушающего контроля показали свою эффективность при выявлении дефектов таких крупногабаритных композитных конструкций, как фюзеляж самолета или лопасть ветроустановки.

Анализ возможностей обнаружения дефектов методами инфракрасной термографии был проведен с использованием моделирующего программного обеспечения ThermoCalc 3D. Рассматривалось применение двух технологий: оптической синхронизации и импульсной термографии (рис. 1). С целью проверки пригодности указанных технологий для контроля монолитного материала на образце были имитированы дефекты, различающиеся по размерам, глубине и расположению.

Результаты моделирования образца из монолитного армированного углепластика показали, что как оптическая синхронизация, так и импульсная термография позволяют обнаруживать дефекты, несмотря на то, что оба метода могут применяться с определенными ограничениями. Для выявления глубоких дефектов в образце монолитного армированного углепластика толщиной 20 мм при помощи оптической синхронизации наиболее эффективным оказалось использование коротких волнообразных импульсов нагрева, при этом требовался нагрев в течение длительного времени – от 60 до 120 с. Кроме того, было установлено, что сохраняющаяся значительная мощность нагрева способствует увеличению температуры образца в целом.

Моделирование использования импульсной термографии для монолитного образца также показало интересные результаты. Прежде всего, отмечена более высокая надежность этого метода для обнаружения дефектов размером до 5-10 мм при выраженных температурных сигналах. При большем уровне термочувствительности болометрической матрицы

инфракрасной камеры отмечается соответственно больший уровень шумов и меньшая точность измерений (рис. 1). Однако моделирование с использованием близких к реальным значений времени нагрева для образца из монолитного армированного углепластика толщиной 20 мм не дало адекватных результатов, что, возможно, обусловлено его значительной толщиной. Поэтому использовались главным образом значения времени нагрева образца, равные 0,1 с, при импульсе нагрева, эквивалентном 3-6 кДж в зоне шириной 90 мм. Обычно импульсная термография проводится достаточно быстро и не предполагает длительных наблюдений. Тем не менее для того чтобы выяснить, сколько дефектов может быть обнаружено, проводилось наблюдение в течение длительного времени – от 40 до 60 с.



*Рис. 1. Сравнительные изображения инфракрасной камеры для величины термочувствительности 60 (слева) и 80 мК*

Подобные дефекты моделировались и для компонента сэндвич-панели. Дополнительно проводилось моделирование дефектов, возникающих между покрытиями панелей из монолитного углепластика и наполнителем из пенопласта.

По результатам моделирования оптической синхронизации был сделан вывод, что большинство настроек, в том числе соответствующих низким уровням плотности энергии нагрева, позволяли выявлять дефекты размером не менее 3,75 мм. Дефекты размером от 5 мм выявляются главным образом через температурный сигнал. Дефекты, расположенные между наполнителем из пенопласта и задним покрытием, оставались не выявленными при различных настройках. Пока не удалось выяснить, можно ли обнаружить их методом импульсной термографии в режиме отражения, поскольку наполнитель из пенопласта является теплостойким материалом, который, возможно, отражает тепло, и оно возвращается к источнику.

При моделировании импульсной термографии сэндвич-панели было установлено, что использование близких к реальным значений времени

нагрева позволяло достичь адекватных результатов в компоненте сэндвич-панели с покрытием из углепластика с обеих сторон и помещенным между ними наполнителем на основе полиэтилентерефталата толщиной 40 мм. Однако любые дефекты, расположенные на глубине более 5 мм от поверхности и за пределами центральной части панели, были неразличимы. Дополнительная обработка изображения при моделировании короткого времени наблюдения не позволила достичь улучшения различения дефектов. Практически импульсная термография смогла дать адекватный результат только при контроле передней поверхности образца сэндвич-панели.

Анализ возможностей выявления дефектов при помощи ультразвуковой диагностики был проведен с использованием программного обеспечения COMSOL, основанного на применении прерывистого метода Галеркина для описания распространения импульса в ортотропных материалах. Моделирование ультразвуковой диагностики проводилось с целью изучения использования волн Лэмба и ультразвукового метода поверхностной волны, созданной действием воздушной волны. Для монолитного компонента было проведено дополнительное моделирование диагностики эхоимпульсным методом с использованием программного обеспечения SimNDT.

Дефект размером 10x1x1 мм был обнаружен в монолитном образце на глубине 17 мм. Результаты моделирования показывают, что дефект можно выявить, используя эхоимпульсный метод. Для материала сэндвич-панелей при моделировании применялись волны Лэмба с частотами от 100 до 200 кГц.

Моделирование использования инфракрасных технологий показало их способность обнаруживать дефекты до определенной глубины. Однако обе технологии имеют ограничения. Импульсная термография для обоих образцов более эффективна при выявлении дефектов, находящихся на глубине 5-10 мм. Более глубокие дефекты, например, на глубине 15 мм, в монолитном компоненте в основном определялись методом оптической синхронизации, когда тепловая нагрузка прикладывалась к образцу на время до 2 мин. Дефекты, расположенные ниже центральной части наполнителя сэндвич-панели, при помощи инфракрасной технологии обнаруживать не удавалось.

Моделирование поиска дефектов методом ультразвукового тестирования показало преобладающее распространение антисимметричной волны Лэмба. Установлено, что волны Лэмба могут использоваться для неразрушающих испытаний монолитных конструкций и сэндвич-панелей. Кроме того, проведенное эхо-импульсное моделирование монолитного компонента показало, что данный метод может быть применен для

выявления более глубоких дефектов, обнаружить которые с помощью инфракрасных технологий ранее не удавалось.

В рамках второй фазы проекта Gearbodies планируется провести эксперименты с реальными образцами монолитного армированного углепластика и сэндвич-панелей и сопоставить полученные данные с результатами выполненного ранее моделирования.

*Источники: Железные дороги мира – 2022 – № 6 – С. 41-43;  
gearbodies.eu (отчет по гранту № 101013296)*