ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

**МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**X МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«Химия нефти и газа»**

Томск

Издательский Дом ТГУ

2018

DOI: 10.17223/9785946217408/316

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СИНХРОННОЙ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аношкин А.Н., Головин Д.В., Пеленев К.А., Осокин В.М.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Применение нового класса изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) является перспективным направлением в ракетно-космической, авиационной и автомобильной отрасли. Данная общемировая тенденция обусловлена очевидным преимуществом изделий из ПКМ снижением веса при более высоких значениях показателей прочности и жесткости, что в свою очередь позволяет увеличивать показатели несущей способности, экономичности, топливной эффективности и, как следствие, экологичности.

Одним из критериев качества изделий из композитов, от которых напрямую зависит их несущая способность и эксплуатационная надежность, является отсутствие дефектов или их наличие в определенном диапазоне величин. В общепринятую практику и культуру производства изделий из ПКМ входят неразрушающие методы контроля (НМК) как неотъемлемый процесс производства и приемки.

Синхронная инфракрасная (ИК) термография, более известная в зарубежных источниках как lock-in IR-thermography, является перспективным направлением неразрушающего контроля изделий из ПКМ. К преимуществам данного метода можно отнести, высокую производительность, возможность осуществления автоматизации процесса контроля и обработки данных, доступность базисных компонентов в виде ИК-камер и источников ИК-энергии в виде галогеновых ламп, наглядность результатов контроля.

Одним из основных этапов разработки технологии теплового неразрушающего контроля изделий из ПКМ является проведение численного моделирования процессов теплового воздействия на композиционный материал. Данный этап необходим для оценки наиболее рациональных параметров и методик, а также выбора режима теплового воздействия, в число которых входит удельная мощность теплового потока, амплитуда, частота, форма и количество циклов теплового воздействия. При этом критериями качественной и количественной оценки будут являться максимальный тепловой контраст, размерность теплового пятна, фазовый сдвиг изменения температур в дефектных и бездефектных зонах относительно сигнала теплового воздействия.

В качестве инструмента моделирования и проведения численных расчетов был выбран программный конечно-элементный комплекс Ansys 14.5 с модулем анализа нестационарных термических процессов Transient thermal. Задача рассматривалась в плоской двумерной постановке с целью увеличения скорости расчетов и снижения вычислительных затрат. При этом моделировалась плоскость поперечного сечения углепластикового образца с заложенными дефектами из фторопласта, которые имитируют расслоение. Размерность ячейки составила 0,22 мм, что соответствует средней толщине монослоя препега.

В математической модели расчета учитывалась все механизмы теплопередачи. При этом нестационарное распределение тепла в анизотропном материале описывается уравнением (1), тепловые потери с поверхности образца от конвективного и лучистого теплообмена с окружающей средой законами Ньютона (2) и Стефана-Больцмана соответственно (3).

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (1)$$

$$Q_{cv} \approx \alpha_{cv}(T_s - T_a) \quad (2)$$

$$Q_{rd} \approx \varepsilon_{red} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

Значения теплофизических характеристик материалов приведены в таблице 1. Для расчетов, в качестве основных исходных данных используются значения плотности материала, теплоемкости и теплопроводности. Учет анизотропии параметров ТФХ углепластика производилось за счет указания значений теплопроводности вдоль ($\parallel$) и поперек ($\perp$) направления волокон.

Секция 6. Методы и средства неразрушающего контроля материалов и конструкций с иерархической структурой

Таблица 1. Теплофизические характеристики материалов.

Материал	Плотность, кг/м ³	Теплоемкость, Дж/(Кг·К)	Теплопроводность Вт/(м·К)	
Углепластик	1500	1758	4,5 ()	0,61 (⊥)
Фторопласт	2140	1010	0,23	

Учет конвективного теплообмена с окружающей средой определялся условиями температуры окружающей среды 22 °С, коэффициентом теплопередачи на границе с воздушной средой 5 Вт/м²·К. Учет лучистого обмена с окружающей средой определялся коэффициентом излучения углепластика равный 0,9.

При численном расчете моделировались воздействие 10 циклов теплового потока различной формы (синусоидальной, треугольной, прямоугольной, пилообразной) со значением максимальной плотности равной 10000 Вт/м², суммарной энергией в 250 КДж и частотой 0,2 Гц. Примеры результатов расчетов приведены в таблице 2. По результатам расчета оценивался максимальный тепловой контраст $\Delta T_{\max}$, К в момент времени t . Наряду с этим была произведена оценка начала проявления дефектов, что представляет собой момент времени, при котором достигалось значение теплового контраста ΔT , превышающее типичное значение чувствительности тепловизоров (равное 0,004 К).

Таблица 2. Результаты расчетов

№	Тип сигнала	$\Delta T_{\max}$, К при t , с	Время начала проявления, с
1	Синусоидальный	0,433 при 56	10,64
2	ШИМ	0,428 при 58	11,00
3	Пилообразный возрастающий	0,447 при 57	11,44
4	Пилообразный спадающий	0,439 при 55	9,84
5	Треугольный	0,432 при 54	9,74

В результате проведенных исследований были получены значения тепловых полей по времени в дефектных и бездефектных областях образцов из углепластиков, которые позволяют дать качественную и количественную оценку способам теплового воздействия при неразрушающем контроле изделий из ПКМ методом ИК-термографии. Предварительные результаты расчетов указывают на незначительную зависимость влияние формы теплового воздействия на процесс выявления дефектов тепловым методом. В дальнейшей исследовательской работе для оценки адекватности математической модели планируется провести валидацию результатов численного расчета с экспериментальными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (договор № 03.G25.31.0232) в рамках реализации Постановления Правительства РФ №218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

Литература

1. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М.: ИД Спектр, 2009. – 544 с.
2. Аношкин А.Н., Сальников А.Ф., Осокин В.М. и др. Неразрушающий контроль изделий из полимерных композиционных материалов // IV Всероссийская научно-практическая конференция производителей рентгеновской техники. Программа и материалы конференции. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. С. 85-90.
3. Дегтярев А. В., Потапов А. М., Исследование свойств углепластиковых сотовых структур для легковесных конструкций ракетно-космического назначения // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, №3, 2012. С. 20-26.