

А. Г. ПРОТАСОВ, д-р пед. наук, доц. НТУ «КПИ»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНТРОЛЯ СОТОВЫХ ПАНЕЛЕЙ ТЕПЛОВЫМ МЕТОДОМ

В работе предлагается использовать метод компьютерного моделирования для исследования возможностей теплового неразрушающего контроля для диагностики состояния сотовых панелей, применяемых в конструкциях летательных аппаратов. Для моделирования был использован пакет прикладных программ COMSOL Multiphysics, позволяющий моделировать технические задачи, в основе которых лежит решение дифференциальных уравнений в частных производных. В качестве модели для исследования была использована трехмерная модель сотовой панели. В результате проведенных исследований были определены оптимальные параметры контроля для обнаружения дефектов типа отслоение обшивки и наличие воды в заполнителе. Лл.: 5. Бібліогр.: 6 наз.

Ключевые слова: сотовая панель, компьютерное моделирование, трехмерная модель.

Введение. В современном авиастроении широко используются сотовые конструкции, которые отличаются высокой прочностью при малом удельном весе. В самолетах последнего поколения более 30% площади фюзеляжа, крыла, киля и других частей самолета изготавливаются из таких материалов. Сотовая панель состоит из двух листов обшивки, между которыми находится сотовая структура. Несущие конструкции самолета выполняются, как правило, из сплавов алюминия, а в качестве заполнителя используют алюминиевую фольгу. Основными дефектами сотовых конструкций являются отслоение обшивки от заполнителя, вследствие непрочности или смятия сот. Эти дефекты могут возникать как при эксплуатации летательного аппарата, так и вовремя изготовления сотовой панели в результате нарушения технологического процесса. Наиболее опасным дефектом считается попадание воды в сотовые структуры элементов самолета. При низких температурах вода замерзает и увеличивает свой объем, что приводит к разрушению ячеек сот и существенно снижает прочность всей конструкции панели. Проблемой является своевременное выявление этих дефектов.

© А. Г. Протасов, 2015

Анализ последних исследований. Для выявления упомянутых дефектов используют различные методы контроля. Наиболее применяемые – метод механического импеданса, радиационный, ультразвуковой и др. методы неразрушающего контроля. Однако большинство из указанных методов имеют ряд недостатков, которые сужают область их применения. Метод механического импеданса является трудоемким и имеет низкую производительность контроля [1]. Рентгеновский метод требует двустороннего доступа к элементам конструкции, что не всегда выполнимо и реализуется при помощи дорогостоящего оборудования. Ультразвуковой метод является контактным и имеет низкую производительность контроля. Последнее время, для диагностики сотовых конструкций стали применять и тепловой метод контроля, который имеет определенные преимущества по сравнению с традиционными [2, 3]. В первую очередь это производительность контроля и возможность автоматизации его процесса. Этот метод нашел успешное применение для контроля состояния элементов конструкций самолетов в таких компаниях, как Airbus Industry и Boeing [4, 5]. Однако возникает ряд вопросов связанных с обнаружением дефектов в сотовых конструкциях, выполненных из сплавов алюминия. Проблему создает высокая теплопроводность таких конструкций, которая является причиной быстротечности тепловых процессов в объекте, что затрудняет процедуру контроля.

Цель статьи. Предлагается исследовать возможности теплового метода контроля сотовых панелей, используя компьютерное моделирование, которое позволит визуализировать невидимые для исследователя процессы и определить оптимальные режимы контроля.

Постановка проблемы. Для реализации предложенного метода используем пакет прикладных программ COMSOL Multiphysics, который является интерактивной средой для моделирования научных и технических задач, в основе которых лежит решение дифференциальных уравнений в частных производных. Система COMSOL позволяет формировать модели физических объектов с заданными параметрами и свойствами, разрабатывать систему уравнений, которая полностью описывает эту модель. COMSOL имеет несколько взаимосвязанных между собой прикладных режимов и за счет внутренних средств, для этих режимов создается возможность построения системы уравнений. Для решения системы уравнений в частных производных система использует метод конечных элементов. Программное обеспечение выполняет конечно-элементный анализ одновременно с адаптивным построением сетки, при этом используется целый ряд численных решателей. Ядро COMSOL дает пользователю возможность моделирования и

анализа во многих прикладных областях [6]. Рассмотрим возможности системы COMSOL для решения прямой задачи теплового контроля сотовых панелей на примере трехмерной модели.

В качестве модели построим сотовую конструкцию, которая имеет два вида дефектов – отслоение обшивки от сотового заполнителя и наличие воды в ячейке соты. Верхняя обшивка панели нагревается от внешнего источника тепла. Процесс нагрева модели объекта контроля описывается трехмерным нестационарным уравнением теплопроводности:

$$c_n \rho_n \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_n \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right);$$

где T - температура, t – текущее время, x, y, z – пространственные координаты точек, которые анализируются в n -й области.

$$(x, y, z) \in \sum_{n=1}^3 M_n; c_n, \rho_n, \lambda_n;$$

где c_n, ρ_n, λ_n теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности соответственно в n -й области, $n=1$ соответствует материалу сотовой панели,

$n=2$ –воздушный дефект, $n=3$ – вода в заполнителе.

На границах областей М1 и М2 (объект – воздушный дефект), а также М1и М3 (объект – вода) имеет место условие термического сопряжения, т.е. граничные условия 4-го рода. Верхняя поверхность сотовой панели нагревается от внешнего источника, поэтому на этой поверхности будут действовать граничные условия в виде:

$$\lambda_1 \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \Big| = q(t);$$

$$q(t) = \begin{cases} Q_{npu} & 0 < t < t_n \\ Q_{npu} & t < 0 \text{ или } t > t_n. \end{cases}$$

Здесь Q -плотность теплового потока от источника нагрева. Остальные наружные поверхности панели участвуют в процессе теплообмена с окружающей средой по закону Ньютона, что соответствует граничным условиям 3-го рода. Начальные условия могут быть заданы следующим образом: $T|_{t=0} = T_0$.

Материалы исследований. Созданная для исследования трехмерная модель сотовой панели представлена на Рис.1, где М1 соответствует области, выполненной из материала панели (алю-

миний), M2 представляет область отслоения обшивки (воздушный дефект) и M3—область, заполненная водой.

На Рис.2 схематично показано сечение созданной модели, которая имеет следующие размеры: расстояние между верхней и нижней обшивками – 10 мм, толщина обшивки – 0,5 мм, толщина заполнителя (алюминиевая фольга) – 0,2 мм, раскрытие воздушного дефекта – 0,4 мм .

В процессе компьютерного исследования трехмерная модель сотовой панели нагревалась до температуры от 303 до 353К. После окончания нагрева, с временным шагом в 0,1 сек, было получено семейство термопрофилей с верхней и нижней поверхности панели.

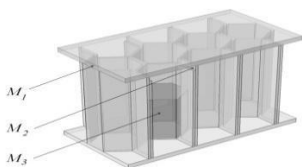


Рис. 1. Общий вид трехмерной модели

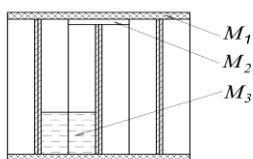


Рис. 2. Схема сечения панели

Это позволило определить оптимальное время контроля, т.е. время при котором наступает максимальная разность температур между дефектным и бездефектным участками панели, что существенно повышает чувствительность метода контроля.

Результаты компьютерного моделирования. На Рис. 3 показаны термограммы верхней (а) и нижней (б) обшивки сотовой панели с дефектом. В качестве дефекта рассматривалось отслоение верхней обшивки панели от одной ячейки заполнителя, а также наличие воды в той же ячейке (см. схему на Рис. 2).

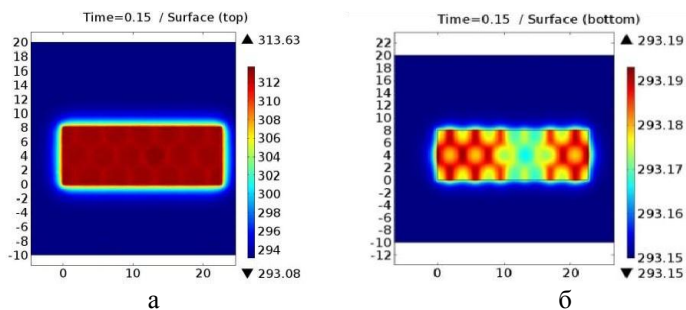


Рис. 3. Термограммы сотовой панели с дефектом: а – термограмма верхней обшивки, б – термограмма нижней обшивки панели

Нагрев производился со стороны верхней обшивки до температуры 313 К, термограммы были получены через 0,15 сек после окончания нагрева. Как видно из рисунка, термограмма верхней обшивки панели не несет информации о наличии дефекта в структуре. В тоже время на термограмме нижней обшивки отчетливо просматривается искажение температурного поля, вызванное наличием дефекта. Это объясняется высокой теплопроводностью алюминиевой конструкции.

В результате компьютерного моделирования были получены результаты, которые невозможно получить экспериментальным путем. Рис. 4. демонстрирует распределение температурного поля внутри

дефектной структуры (сечение, выполненное вдоль центральной оси панели). На термограмме видны температурные аномалии в области дефекта структуры.

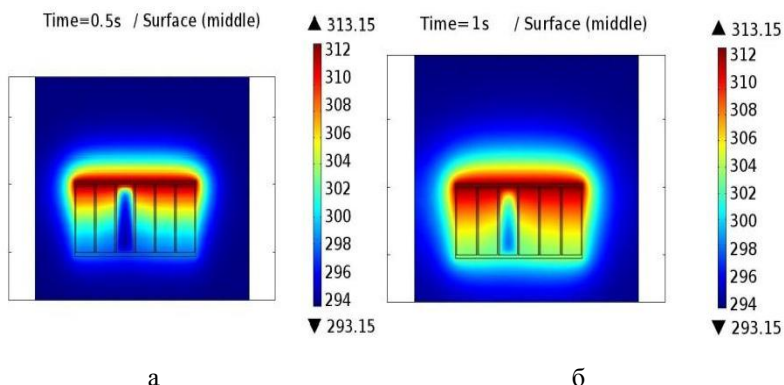


Рис. 4. Термограммы сечения сотовой панели с дефектом: а – 0,5 сек, б – 1 сек после начала нагрева

Компьютерная реализация теплового контроля позволила получить временные зависимости температурного профиля обшивок (Рис.5а), а также временные зависимости разности температур между дефектным и бездефектным участками объекта, что и является критерием дефектности (Рис.5б).

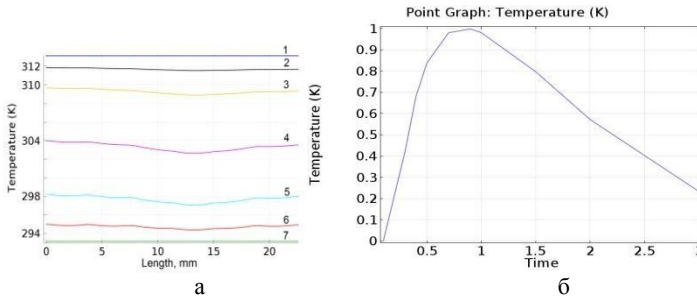


Рис. 5. Временные зависимости: а - температурного профиля верхней поверхности (1- 0, 5 сек), нижней поверхности панели (2 – 0,1 сек; 3 – 0,2 сек; 4 – 0,3 сек; 5 – 0,4 сек; 6 – 2 сек; 7 – 3 сек), б - разности температур между дефектным и бездефектным участками

На Рис. 5 а показано распределение температуры на верхней (кривая 1) и нижней (кривые 2-7) поверхности панели в различные моменты времени. В промежутке времени 0,3 – 0,4 сек (кривые 4 и 5) наблюдается искажение термопрофиля нижней поверхности, которое с течением времени исчезает. Рис. 5 б демонстрирует оптимальное время контроля для данной температуры нагрева. В данном случае оптимальная температура нагрева объекта -313К, оптимальное время контроля – 0,6-1 сек.

Выводы. Полученные результаты подтверждают возможность применения пакета прикладных программ COMSOL Multiphysics для исследования процессов, протекающих при активном тепловом контроле сотовых панелей, выполненных из металлов. Компьютерное моделирование позволяет визуализировать тепловые процессы, протекающие в объекте во время контроля, определить оптимальные значения таких параметров процесса контроля как температура нагрева объекта и время проведения контроля. Пакетпрограмм COMSOL Multiphysics дает возможность варьировать размерами и материалом объекта контроля.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на определение геометрических размеров воздушных дефектов в объекте, а также оценке количества влаги в сотовой структуре.

Список литературы:1. Протасов А. Г. Влияние параметров сотовой конструкции на выявляемость дефектов при контроле импедансным методом / А.Г. Протасов, О.С. Юрченко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, Киев, 2006. - №3. - С. 48-51. 2. Нестерук Д.А. Особенности применения теплового метода неразрушающего контроля для обнаружения и оценки массы воды в сотовых панелях авиационной тех-

ники. / Д.А. Нестерук, В.П. Вавилов //Известия ТПУ, 2004. - №6, том 307. - С. 62-65.**3.**Стороженко В.А.Обработка результатов тепловой дефектоскопии сотовых конструкций с целью понижения уровня помех/ В.А.Стороженко, О.В. Лазоренко, А. В. Мязкий// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 34 (1007). – С. 108–112. **4.** A318/A319/A320/A321 Nondestructive testing manual, Part 10, A. 55-20-06 – Thermographic, Page block 1001.**5.** Boeing 777, Nondestructive testing manual, Part 9 – Thermography, 51-00-01, 51-00-02, 51-00-03.**6.**Егоров В.И.ПрименениеЭВМдлярешениязадачтеплопроводности. Учебное пособие / В.И. Егоров– СПб: СПб ГУ ИТМО, 2006. – 77с.

Bibliography (transliterated):**1.** Protasov A. G. "Vlijanie parametrov sotovoj konstrukcii na vyjavljaemost' defektov pri kontroleimpedansnym metodom". Tehnicheskajadiagnostika i nerazrushajushhij kontrol', Kiev, 2006. - No3.. 48-51. Print.**2.** Nesteruk D.A, Vavilov V.P. "Osobennosti primenenija teplovogo metoda nerazrushajushhego kontrolja dlja obnaruzhenija i ocenki massy vody v sotovyh paneljah aviacionnoj tehniki". Izvestija TPU, 2004. –No 6, Vol 307. 62-65.Print.**3.** Storozhenko V.A. Lazorenko O.V., Mjagkij A. V. "Obrabotka rezul'tatov teplovoj defektoskopii sotovyh konstrukcij s cel'ju poni-zhenija urovnja pomeh". Visnik NTU «KhPI». Serija: Elektroenergetika ta peretvorjuval'na tehnika. – H. : NTU «KhPI», 2013. –No 34 (1007). 108–112. Print.**4.** A318/A319/A320/A321 Nondestructive testing manual, Part 10, A. 55-20-06 – Thermographic, Page block 1001. Print. **5.** Boeing 777, Nondestructive testing manual, Part 9 – Thermography, 51-00-01, 51-00-02, 51-00-03. Print. **6.** Egorov V.I. Primenenie JeVM dlja reshenija zadach teploprovodnosti. Uchebnoe posobie – SPb: SPb GU ITMO, 2006. – 77. Print.

Поступила(received)28.05.2015