

Ю. И. Димитриенко, И. К. Краснов,
Г. Ф. Реш, Д. Акинкин, И. Кузнецов

РАЗРАБОТКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ РЕШЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ТРЕХСЛОЙНЫХ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Предложена математическая модель тепловых процессов в трехслойных сварных конструкциях с дефектами сварных соединений. Сформулирована постановка геометрически обратной задачи тепловой диагностики конструкций на основе тепловизионного метода. Разработан алгоритм ее численного решения, основанный на сведении к задаче оптимизации и конечно-элементного решения последовательности прямых трехмерных задач теплопроводности. Приведены результаты численного решения задачи.

E-mail: dimit.bmstu@gmail.com

Ключевые слова: геометрически обратные задачи, диагностика, тепловизор, вычислительные технологии, метод конечных элементов, трехслойные сварные конструкции.

Проблемы определения качества и оперативной достоверной диагностики технического состояния материалов и конструкций актуальны для изделий авиакосмической техники. Метод теплового неразрушающего контроля (ТНК), основанный на применении современных тепловизоров, благодаря бесконтактности, возможности контроля объектов в процессе их испытаний и штатной эксплуатации, высокой информативности позволяет эффективно решать задачи технической диагностики [1—4]. Объектами тепловой дефектоскопии служат структуры, содержащие трещины, пустоты, поры, раковины, зоны непровара, непрочлея, плохой тепло- и электроизоляции, неоднородности состава, посторонние примеси, области термического и усталостного перенапряжения и другие дефекты.

Малоизученной областью является анализ возможности применения методов ТНК для диагностики многослойных тонкостенных сварных конструкций, при изготовлении которых часто возникают дефекты сварных соединений. Работоспособность таких конструкций во время эксплуатации существенно зависит от качества сварных соединений. Задача дефектоскопии в этом случае имеет особенности, связанные со сложной криволинейной формой в зоне сварки, с тонкостенностью и многослойностью конструкции, что затрудняет непосредственный анализ данных ТНК и обуславливает необходимость разработки специальных математических методов решения геомет-

рически обратных задач для обнаружения дефектов по результатам тепловизионных измерений [5—12].

В работах [13—17] был предложен метод решения геометрически обратных задач тепловой диагностики (ГОЗТД) для «традиционных» конструкций типа однослойных пластин и оболочек с дефектами в виде расслоений. Метод основан на конечно-элементном (КЭ) решении обратных задач теплопроводности для конструкций с дефектами при использовании специальных алгоритмов обработки данных тепловизионных измерений. Применение метода решения ГОЗТД для многослойных тонкостенных сварных соединений затруднено тем, что даже задание геометрии конструкции с дефектом в зоне точечной сварки является сложной математической задачей, поскольку на границе материалов различной природы форма элементов конструкции не имеет строгого математического описания и характеризуется значительной разномасштабностью: отношение характерной высоты раскрытия дефекта сварки к макроскопическому размеру сварной конструкции обычно составляет $10^{-4} \dots 10^{-3}$. Формирование твердотельной компьютерной геометрии такой конструкции с помощью современных систем геометрического моделирования типа SolidWorks или «Компас» связано со значительными сложностями. Еще большие осложнения возникают при генерации трехмерных конечно-элементных сеток для таких конструкций с дефектами сварки.

Целью данной работы является разработка вычислительной технологии решения ГОЗТД применительно к многослойным тонкостенным сварным конструкциям, которая включает создание алгоритмов геометрического твердотельного моделирования тонкостенных конструкций с дефектами и алгоритма КЭ-решения задач теплопроводности в рассматриваемых типах конструкций.

Дефекты трехслойных сварных конструкций. Трехслойные сварные оболочки широко используют в качестве корпусов двигателей летательных аппаратов. Внешний и внутренний слои (пластины) такой конструкции обычно имеют гладкую поверхность. Между ними расположен промежуточный слой из соединительных элементов, имеющих вид усеченных конусов, которые приваривают к двум другим слоям (рис. 1). Соединение слоев конструкции осуществляется точечной сваркой; при этом в месте соединения листов возникает сплав металлов — ядро сварки, которое имеет форму, близкую к эллипсоиду (между внешним и средним слоями) или к цилиндру (между средним и внутренним слоями конструкции).

Вследствие нарушения технологического процесса при сварке пластин конструкции корпуса в ядрах сварки могут появиться дефекты в виде полостей. Иногда при сварке внутреннего и среднего слоев конструкции происходит прожигание обеих пластин и образуется от-

верстие — прожог. При точечной сварке может возникнуть выплеск; в этом случае внутри ядра сварки, имеющего форму эллипсоида, образуется сферическая полость.

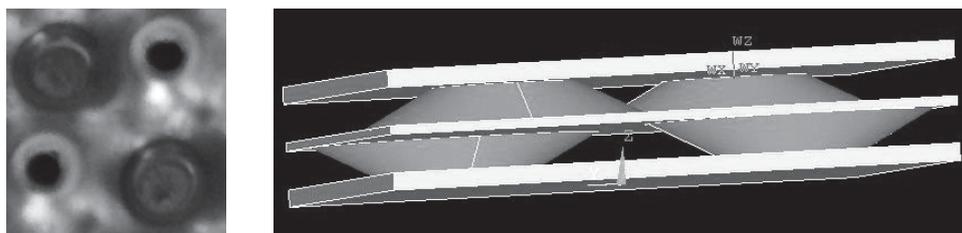


Рис. 1. Элемент трехслойной сварной конструкции и его компьютерная 3D-модель

Диагностирование прожога методами тепловой дефектоскопии не имеет смысла, так как он может быть определен визуально, путем внимательного осмотра внутренней части оболочки. Интерес представляет только дефект типа «выплеск», так как он является скрытым.

Схема диагностических тепловизионных измерений. Для получения термограммы (значений температур на внешней стенке трехслойной пластины) исследуемый корпус нагревают изнутри кварцевой лампой до температуры порядка 80 °С. С внешней стороны корпуса снимают картину температурного поля с помощью измерительного прибора — термографа.

На основании термограммы, полученной с помощью термографа, необходимо определить наличие дефекта в зонах точечной сварки между верхней и средней пластинами. Схема, отражающая этапы тепловой диагностики в рамках концептуальной модели, приведена на рис. 2.



Рис. 2. Схема нагрева и тепловизионных измерений трехслойной сварной конструкции

Моделирование геометрии трехслойной сварной конструкции с дефектами. Описанная выше трехслойная сварная конструкция об-

ладает периодической структурой. В общем случае она является криволинейной, а для относительно небольших фрагментов двигательных установок можно рассматривать модель с прямолинейной периодической структурой, в которой ячейка периодичности имеет вид параллелограмма и включает два конуса среднего слоя, приваренных к внешнему слою, и два конуса, приваренных к внутреннему слою.

Дефекты в сварной конструкции считали расположенными в верхнем слое конструкции. Форма дефектов — эллипсоид с главными осями, ориентированными по осям декартовой системы координат, две оси которой, в свою очередь, параллельны плоскостям трехслойной конструкции. Две полуоси эллипсоида выбирались совпадающими, чтобы в плане дефекты имели форму круга. Заданные таким образом дефекты сварной конструкции характеризуются тремя параметрами (рис. 3): глубиной залегания дефекта h (расстояние от внешней поверхности верхнего слоя конструкции до центра симметрии эллипсоида), характерным размером дефекта μ (большая ось эллипсоида) и толщиной раскрытия дефекта z (малая ось эллипсоида).

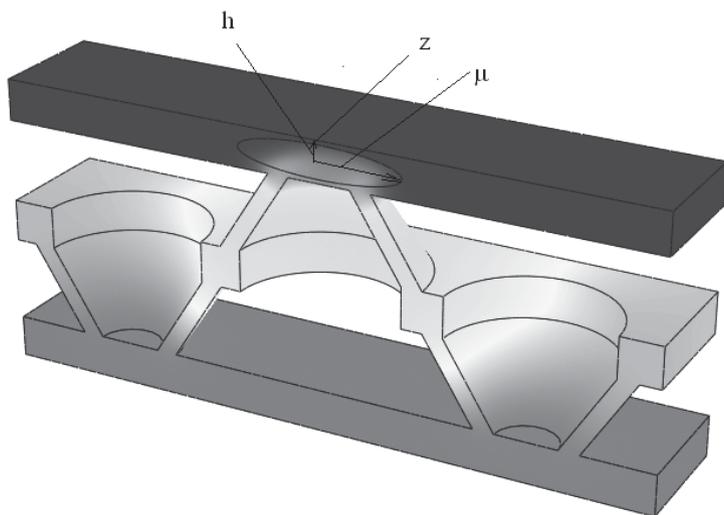


Рис. 3. Компьютерная модель ячейки периодичности трехслойной конструкции с дефектом

Математическая постановка геометрически обратной задачи тепловой диагностики. Пусть Ω — исследуемая область сварной конструкции, $\Sigma = \partial\Omega$ — граница области Ω . Для расчета температурного поля в трехслойной сварной конструкции рассмотрим нестационарную задачу теплопроводности в трехмерной постановке:

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (\Lambda \cdot \nabla \theta), \quad \mathbf{x} \in \Omega, \quad t \in (0, t_m);$$

$$\begin{aligned}
& \theta|_{t=0} = \theta_0, \quad \mathbf{x} \in \Omega \cup S; \\
& \theta|_{\mathbf{x} \in S_d} = \theta_d(\mathbf{x}, t), \quad t \geq 0; \\
& -\mathbf{n} \cdot \mathbf{\Lambda} \cdot \nabla \theta|_{\mathbf{x} \in S_q} = q, \quad t \geq 0; \\
& \mathbf{n} \cdot \left(\mathbf{\Lambda} \cdot \nabla \theta|_{\mathbf{x} \in S_{k+}} - \mathbf{\Lambda} \cdot \nabla \theta|_{\mathbf{x} \in S_{k-}} \right) = 0; \\
& \theta|_{\mathbf{x} \in S_{k+}} = \theta|_{\mathbf{x} \in S_{k-}}, \quad t \geq 0; \\
& -\mathbf{n} \cdot \mathbf{\Lambda} \cdot \nabla \theta|_{\mathbf{x} \in S_c} = \alpha \left(\theta|_{\mathbf{x} \in S_c} - \theta_c \right), \quad t \geq 0; \\
& -\mathbf{n} \cdot \mathbf{\Lambda} \cdot \nabla \theta|_{\mathbf{x} \in S_r, S_D} = \sigma_0 \varepsilon \left(\theta^4(\mathbf{x}, t) - \theta^4(\mathbf{x}_1, t) \right), \quad t \geq 0,
\end{aligned} \tag{1}$$

где ρ — плотность; c — теплоемкость; \mathbf{x} и \mathbf{x}_1 — материальные точки области Ω ; $\mathbf{\Lambda}$ — симметричный тензор теплопроводности; θ — температура; $\nabla \theta$ — градиент температуры; θ_0 — начальное значение температуры в момент времени $t = 0$; t_m — длительность измерения; θ_d — заданная температура на части поверхности S_d конструкции тела; q — тепловой поток на части S_q поверхности конструкции; S_k — поверхность контакта; α — коэффициент теплоотдачи; S_c, S_r — верхняя и внутренние поверхности конструкции; S_d — поверхность дефекта; θ_c — температура окружающей среды; σ_0 — постоянная Стефана—Больцмана; ε — коэффициент излучения поверхности тела.

Для трехслойной сварной конструкции были выбраны следующие граничные условия:

- на нижней нагреваемой поверхности конструкции S_d задана температура нагрева θ_d ;
- на верхней поверхности конструкции S_c задано условие конвективного теплообмена;
- на внутренних поверхностях конструкции S_r между ее слоями и соединительными элементами задано условие теплообмена излучением;
- на боковых поверхностях конструкции S_q задано условие теплоизоляции;

- на поверхностях контакта S_k сварных соединений задано условие идеального контакта;
- на поверхностях дефекта S_D сварных соединений задано условие теплообмена излучением.

Обозначим через $\theta|_{\mathbf{x} \in S_c} = \theta_c(\mathbf{x}, t)$ расчетное температурное поле на наблюдаемой с помощью тепловизора поверхности S_c конструкции. Пусть известно также экспериментальное значение температурного поля $\theta_e(\mathbf{x}, t_e)$ на этой же поверхности в момент времени t_e .

С учетом изложенного ГОЗТД формулируется следующим образом: найти такие значения параметров h, μ, z из множества допустимых значений V , которые обеспечивают минимум функционалу относительной ошибки вычислений температурного поля:

$$H_D(h, \mu, z) \rightarrow \min H_D(h, \mu, z) = \frac{1}{S} \int_S \left(1 - \frac{\theta(\mathbf{x}, t_e)}{\theta_e(\mathbf{x}, t_e)} \right)^2 dS. \quad (2)$$

Алгоритмы численного решения задачи. Задача (1), (2) представляет собой задачу оптимизации. Для ее численного решения применяют итерационные методы градиентного спуска и Хука—Дживса, на каждом шаге итерации которых осуществляется решение прямой задачи теплопроводности (1). Численное решение этой задачи выпол-

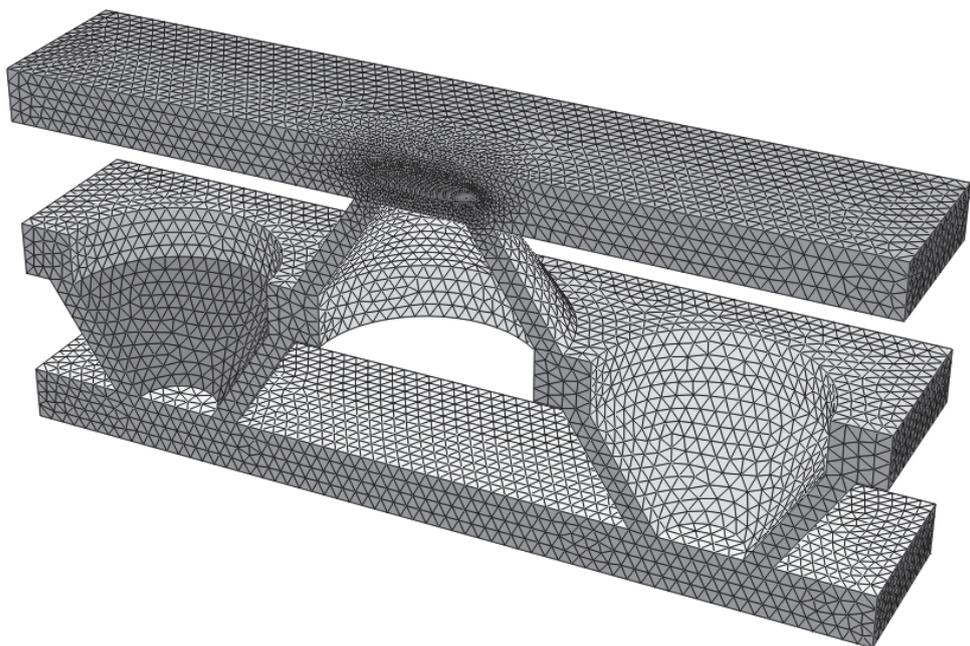


Рис. 4. Конечно-элементная сетка трехслойной сварной конструкции с дефектом

нялось методом конечных элементов, при этом в качестве конечного элемента выбран 10-узловой тетраэдр. Разрешающая система дифференциальных уравнений нестационарной задачи теплопроводности решается методом Кранка—Николсона—Галёркина. При переходе на новый шаг итерации в пространстве параметров V проводилась перестройка КЭ-сетки и заново осуществлялось численное КЭ-решение задачи (1). Типичная КЭ-сетка, использованная в расчетах, показана на рис. 4. Для решения прямой задачи (1) использовался программный комплекс GCD, разработанный на кафедре ФН-11 МГТУ им. Н.Э. Баумана. В рамках этого комплекса был создан программный модуль, реализующий описанный выше алгоритм численного решения задачи.

Результаты численного решения ГОЗТД. Тестирование разработанного программного модуля было проведено путем сравнения результатов численных расчетов с результатами, получаемыми для простейших тестовых геометрий с помощью программного комплекса ANSYS. Для тестирования были выбраны две простейшие фигуры — цилиндр и блок с двумя цилиндрами. На границах этих областей были заданы граничные условия первого рода. Результаты тестирования на простейших телах показали достаточную точность вычислений: различие температур в телах, полученное с помощью разработанного программного модуля и с помощью комплекса ANSYS, не превышало 0,1 %.

При численном моделировании теплообмена в трехслойной сварной конструкции температура на нижней поверхности была принята равной 80 °С. Для верхней поверхности были получены значения температуры, лежащие в диапазоне 18...21 °С. Наименьшие значения температуры отмечались в области дефекта, поскольку дефект является своего рода теплоизолятором и проводит теплоту (только за счет переизлучения) хуже, чем бездефектная часть конструкции. Далее выполнялось сравнение расчетных значений температурного поля на внешней поверхности конструкции с экспериментальным значением, определенным с помощью тепловизора, вычислялся функционал ошибки (2) и осуществлялся переход к следующему шагу итерации.

В результате вычислений за 52 итерации был определен минимум функционала ошибок, при котором его значения достигают 0,1 % (рис. 5). Соответствующие значения параметров дефекта ($h = 0,012$ мм, $\mu = 2,1$ мм, $z = 0,3$ мм) были признаны оптимальными как наиболее достоверно соответствующие экспериментальным значениям температурного поля и, следовательно, наиболее близкие к реальным значениям геометрических параметров дефекта.

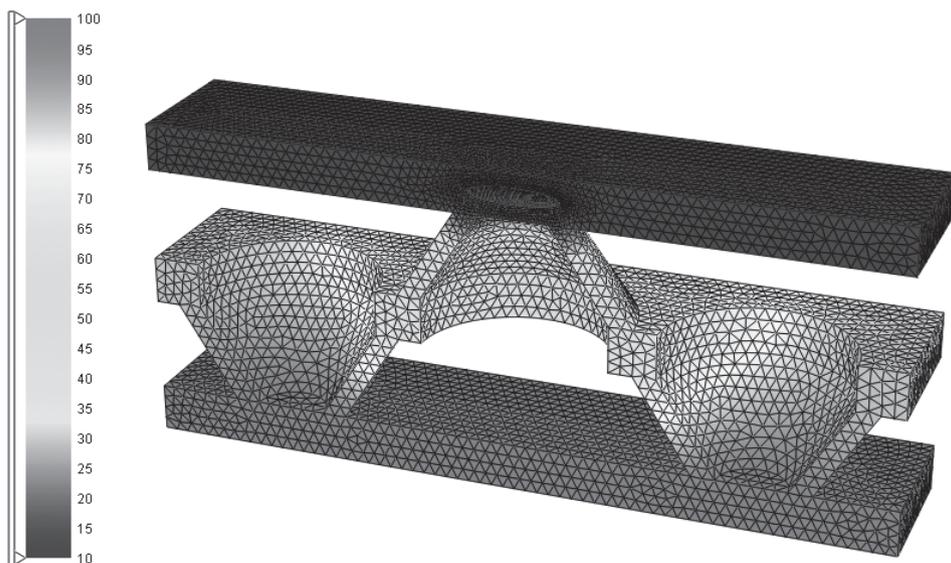


Рис. 5. Распределение температурного поля (°С) в трехслойной сварной конструкции

Выводы. Разработана вычислительная технология, позволяющая на основе результатов тепловизионных измерений обнаруживать дефекты в многослойных сварных конструкциях и определять их размеры. Тестовые испытания показали высокую точность результатов диагностирования с помощью разработанной технологии и возможность ее применения для решения практических задач, в частности для прогнозирования работоспособности сварных конструкций. Предложенная технология может быть использована (при незначительной модификации) для обнаружения дефектов типа отслоения в многослойных конструкциях, например, из композиционных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будадин О. Н., Кутюрин В. Ю., Каледин В. О. Диагностика технического состояния сосудов, работающих под внутренним давлением, тепловым (тепловизионным) методом // Дефектоскопия. – 2008. – № 10. – С. 16–25.
2. Вавилов В. П. Тепловые методы неразрушающего контроля: Справ. – М.: Машиностроение, 1991.
3. Вавилов В. П., Нестерчук Д. А., Ширяев В. В. и др. Тепловая (инфракрасная) томография: терминология, основные процедуры и применение для неразрушающего контроля композиционных материалов // Дефектоскопия. – 2010. – № 3. – С. 3–16.
4. Тепловой неразрушающий контроль изделий / О.Н. Будадин, А.И. Потапов, В.И. Колганов и др. – М.: Наука, 2002.
5. Мацевитый Ю. М. Обратные задачи теплопроводности: В 2 т. / НАН Украины. Ин-т проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного. – Киев: Наук. думка, 2002.

6. Мацевитый Ю. М., Костиков А. О. Математические аспекты решения геометрических обратных задач теплопроводности: проблемы и пути их решения // Проблемы машиностроения. – 2007. – Т. 10, № 3. – С. 27–34.
7. Мурашов В. В., Румянцев А. Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Ч. 1 // Контроль. Диагностика. – 2007. – № 4. – С. 23–31.
8. Стороженко В. А., Вавилов В. П., Волчек А. Д. Неразрушающий контроль качества промышленной продукции активным тепловым методом. – Киев: Тэхника, 1988.
9. Тихонов А. Н., Кальнер В. Д., Гласко В. Ю. Математическое моделирование технологических процессов и метод обратных задач в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1990.
10. Cheng C.-Y., Chang M.-H. Shape identification by inverse heat transfer method // J. Heat Transfer. – 2003. – Vol. 125, N 2. – P. 224–231.
11. Chun Yun Wu, Wen Chang Lin. Using genetic algorithms to defect interfacial cracks based on thermal resistance for multilayer materials // Дефектоскопия. – 2007. – N 7. – С. 71–84.
12. Huang C. H., Shih C. C. A shape identification problem in estimating the interfacial configurations in a multiple region domain // J. Heat Transfer. – 2004.
13. Димитриенко Ю. И., Николаев А. А., Краснов И. К. Автоматизированные технологии распознавания по тепловизионным изображениям трехмерных дефектов в композитных элементах ракетной техники и прогнозирования остаточного ресурса композитных элементов ракетной техники // Люльевские чтения: Матер. Седьмой науч.-техн. конф. / ОАО «ОКБ «Новатор», 23–24 марта 2010 г. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2010. – С. 90.
14. Димитриенко Ю. И., Краснов И. К., Николаев А. А. Разработка автоматизированной технологии распознавания трехмерных дефектов в композитных конструкциях по тепловизионным изображениям // Мат. методы распознавания образов: Сб. докл. 14-й Всерос. конф. – М.: МАКС Пресс, 2009. – С. 515–518.
15. Димитриенко Ю. И., Николаев А. А., Краснов И. К. Разработка автоматизированной технологии распознавания трехмерных дефектов в композитных элементах конструкций по тепловизионным изображениям // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естеств. науки. – 2010. – № 2. – С. 40–48.
16. Димитриенко Ю. И., Николаев А. А., Краснов И. К. Разработка автоматизированных технологий неразрушающего контроля для оценки остаточного ресурса неметаллических конструкций // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование: Сб. тр. Четвертой междунар. науч.-практ. конф. «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – Т. 11. – С. 326–329.
17. Краснов И. К., Николаев А. А. Метод распознавания трехмерных дефектов типа трещин в конструкциях // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естеств. науки. – 2008. – № 3. – С. 104–111.

Статья поступила в редакцию 03.07.2012.