

Ю. И. Димитриенко, А. А. Николаев,
И. К. Краснов

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ РАСПОЗНАВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ДЕФЕКТОВ В КОМПОЗИТНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ ПО ТЕПЛОВИЗИОННЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

Разработана автоматизированная технология и программно-математический комплекс "TSHCSS3D" распознавания трехмерных дефектов и их форм в изотропных и композитных элементах конструкций по изображениям, полученным тепловым неразрушающим контролем.

E-mail: dimit@serv.BMSTU.ru; A.A.Nikolaev@yandex.ru

Ключевые слова: распознавание дефектов, тепловой неразрушающий контроль, метод конечного элемента, задача теплопроводности.

В настоящее время существует большое число методов неразрушающего контроля (НК), на основе которых созданы и создаются технические системы, реализующие диагностирование — распознавание дефектов (их наличие, расположение и геометрические параметры). В таких системах распознавание дефектов проводится либо оператором “на глаз”, либо экспертными системами машинного зрения. При распознавании дефектов в диагностируемых объектах оператору по изображению с дефектами (зашумленному, часто имеющему недостаточную по отношению к фону контрастность и четкость) бывает затруднительно принять правильное решение. Системы машинного зрения, основанные на традиционном подходе обработки каждой точки изображения и имеющие более низкую зрительную эффективность по сравнению с человеком, “захлебываются”, обрабатывая большие объемы данных, и часто выдают неоднозначные результаты. При такой ситуации хорошим результатом диагностирования — распознавания считается определение наличия дефектов и их плоскостных геометрических характеристик, но вопрос об определении трехмерной формы дефектов по данным, полученным быстрыми и недорогими методами НК, не стоит. Для композитных элементов конструкций ситуация с определением трехмерной формы дефектов осложняется неоднородностью структуры и свойств материала. В разработанной авторами автоматизированной технологии распознавания трехмерных дефектов в композитных конструкциях использован наиболее перспективный (быстрый, простой, дешевый и безопасный) активный тепловой НК (ТНК). Предлагаемая технология основывается на обработке входных тепловизионных изображений методами теории контурного анализа,

многократном численном моделировании процесса ТНК, решении задач построения трехмерных геометрических моделей (ГМ) и распознавания форм трехмерных дефектов.

Постановка общей задачи распознавания трехмерных дефектов. Задача распознавания трехмерных дефектов состоит из двух этапов:

- построение трехмерных ГМ дефектов на фоне ГМ объекта контроля;
- автоматическая классификации полученной трехмерной ГМ (определение типа дефекта).

Исходными данными для распознавания трехмерных дефектов являются тепловизионное изображение (достаточно одного), представляющее собой матрицу, элементы которой — это значения температуры на поверхности объекта контроля; информация об условиях проведения ТНК; данные о геометрических параметрах объекта контроля (трехмерная геометрическая модель); информация о тепловых эффективных характеристиках объекта контроля.

По этим данным необходимо определить наличие или отсутствие дефектов, построить трехмерную ГМ и определить тип (форму) дефекта.

Задача первого этапа — это задача распознавания изображений [1], она решается на основе двух разработанных методик, а именно: методики определения плоскостных геометрических параметров дефектов и методики предварительного распознавания формы трехмерных дефектов.

Задача второго этапа решается на основе разработанной методики распознавания формы трехмерных дефектов.

Методика определения плоскостных геометрических характеристик дефектов основывается на решении задач подавления шумов (использованы медианные фильтры) и задач теории контурного анализа. Из одного исходного зашумленного тепловизионного матричного изображения выделяется система контуров $\{\Gamma_{(j)}\}$, $\Gamma_{(j)} = \{\gamma_{(j)}(n)\}_{j=0}^{k-1}$ (реализованы алгоритмы “жука” и Розенфельда [2–4]), которая образует контурный каркас и непрерывный контурный “скелет” из геометрических центров контуров, указывающий на число предполагаемых дефектов (при этом автоматически решается задача сегментации дефектов в плане) и изменение формы дефектов по толщине объекта контроля. Далее по всей структуре контурного каркаса проводится вычисление площадей и распознавание зашумленных контуров [5, 6] соседних уровней (строятся контурные согласованные фильтры [5]).

Распознавание контуров соседних уровней контурного каркаса позволяет из всего множества системы контуров выделить по одному

контуру для каждого предполагаемого дефекта, который содержит данные о геометрическом центре дефекта, ориентации, приблизительной форме (т. е. об искомых плоскостных геометрических характеристиках).

Предварительное распознавание формы трехмерных дефектов в композитных элементах конструкций основано на многократном численном моделировании тепловых процессов в объекте контроля при наложении граничных условий ТНК. При этом накладывается ограничение на распознавание только одного дефекта. Масштабируемая информация о плоскостных геометрических характеристиках дефектов и информация о толщине объекта контроля образуют трехмерное пространство пробных дефектов, где осями являются масштабы контура дефекта $|\mu|$, толщины z и глубины h залегания от поверхности.

Для данного пространства задача распознавания формы ставится как задача минимизации функционала относительной ошибки $\bar{H}(D_m(|\mu_k|, z_l, h_q)) \rightarrow \min$.

Относительная ошибка пробного дефекта вычисляется как

$$\bar{H}_{D_m} = \sum_i \sum_j \left(1 - \frac{\theta_{NMI}^{ij}}{\theta_{TI}^{ij}} \right)^2,$$

где θ_{NMI}^{ij} — значение ij -го элемента матрицы температурного поля, полученного численным моделированием ТНК; θ_{TI}^{ij} — значение ij -го элемента матрицы тепловизионного изображения. Матрица θ_{NMI}^{ij} вычисляется решением методом конечных элементов трехмерной задачи нестационарной теплопроводности:

$$\rho(M)c_v(M) \frac{\partial \theta(M, t)}{\partial t} = \nabla \cdot (\underline{\Lambda}(M) \cdot \vec{\nabla} \theta(M, t)), M \in \Omega, t \in (t_0, t_{\max});$$

$$\theta(M, t)|_{t=0} = \theta_0(M), \quad M \in \Omega \cup \Sigma;$$

$$\theta(M, t)|_{M \in S_d} = \theta_d(M, t), \quad t \geq t_0;$$

$$-\vec{n} \cdot \underline{\Lambda}(M) \cdot \vec{\nabla} \theta(M, t)|_{M \in S_p} = q(M, t)|_{M \in S_p}, \quad t \geq t_0;$$

$$-\vec{n} \cdot \underline{\Lambda}(M) \cdot \vec{\nabla} \theta(M, t)|_{M \in S_c} = \alpha(M, t)(\theta(M, t) - \theta_c(M))|_{M \in S_c}, \quad t \geq t_0;$$

$$\begin{aligned} & -\vec{n} \cdot \underline{\Lambda}(M) \cdot \vec{\nabla} \theta(M, t)|_{M \in S_{Def}} = \\ & = \sigma_0 \varepsilon (\theta^4(M, t) - \theta^4(M_1, t))|_{M, M_1 \in S_{Def}}, \quad t \geq t_0, \end{aligned}$$

где ρ — плотность; M, M_1 — материальные точки области Ω ; c_v — теплоемкость; $\underline{\Lambda}$ — симметричный тензор теплопроводности; $\vec{\nabla} \theta$ —

градиент температуры; θ_0 — температура по всему телу в момент времени t_0 (начальные условия); θ_d — температура на поверхности тела (граничное условие первого рода); q — заданный тепловой поток; α — коэффициент теплоотдачи; θ_c — температура среды, с которой происходит конвективный теплообмен; σ_0 — постоянная Стефана–Больцмана; ε — поглощательная способность поверхности дефекта; S_d, S_p, S_c — участки поверхности тела с граничными условиями постоянной температуры, теплового потока и конвективного теплообмена; S_{Def} — внутренняя поверхность дефекта.

Минимизация функционала относительной ошибки $\bar{H}(D_m) \rightarrow \min$ проводится с применением метода Хука–Дживса, где в качестве начального приближения задается пробный дефект с минимальными параметрами $|\mu_k|, z_l, h_q$.

Результатом предварительного распознавания формы трехмерных дефектов является “оптимальный” пробный дефект, дающий при численном моделировании ТНК температурное поле поверхности контроля, максимально близкое к зарегистрированному тепловизионному полю. Распознанный дефект описывается областью, образуемой набором конечных элементов (тетраэдров), а форма дефекта D_i — набором непересекающихся криволинейных цилиндров $\{\Phi_j^i\}$, формируя при этом трехмерную проволочную ГМ дефекта (рис. 1).

Задача распознавания формы трехмерных дефектов. Получение трехмерной ГМ дефекта позволяет провести непосредственное распознавание формы дефекта, под которым в разработанной автоматизированной технологии понимается определение типа (класса) и подтипа (подкласса) дефекта (например, внутренней раковины, расслоения, внутренней и поверхностной трещин). Тип дефекта и его пространственные характеристики служат исходными данными для

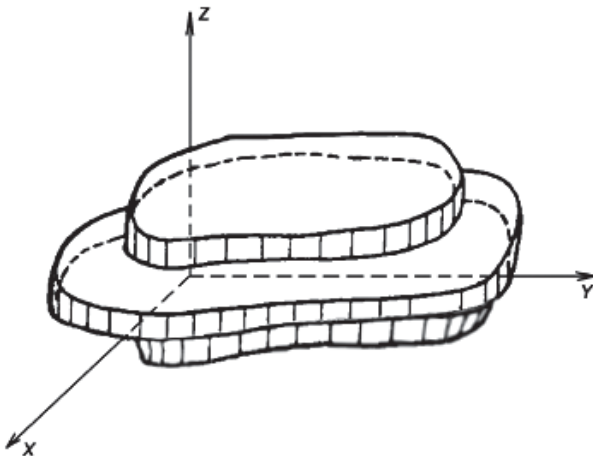


Рис. 1. Набор криволинейных цилиндров, описывающий трехмерную модель дефекта

дальнейшего решения задач определения текущей опасности и прогнозирования долговечности конструкции.

Алгоритм распознавания формы дефектов следующий. Ставится задача распознавания объекта (дефекта) D_i с ГМ $\{\Phi_j^i\}$ из множества классов (типов) числом N . Основание каждого криволинейного цилиндра Φ_j^i , входящего в ГМ $\{\Phi_j^i\}$, сравнивается с набором оснований эталонных моделей (проводится распознавание контуров [5, 6] на основе теории контурного анализа — строятся контурные согласованные фильтры) и определяется наиболее вероятная ГМ. Далее проводится вычисление отношения высот криволинейных цилиндров к ширине оснований и на основе полученных данных выполняется автоматическое отнесение дефекта к одному из подтипов (типов).

Программно-математический комплекс (ПМК) “TSHCSS3D” создан на базе рассмотренной концепции технологии распознавания трехмерных дефектов и реализован в среде “MS Visual Studio 2005”. В качестве исходной информации в ПМК используются файлы тепловизионного изображения и трехмерного изображения объекта контроля. Разработан удобный диалоговый интерфейс, посредством которого вводятся параметры задачи распознавания дефектов.

В 2008–2009 гг. ПМК “TSHCSS3D” прошел стадии отладки и тестирования, в том числе и на изображениях реальных композитных оболочек с дефектами, полученных на ведущих предприятиях в области производства и диагностики композитных материалов (ОАО “Центральный НИИ специального машиностроения” и ОАО “Технологический институт ВЕМО”). Ниже приведен пример распознавания дефекта в многослойной композитной пластине.

Диагностируемая пластина из стеклопластика размером $250 \times 70 \times 9$ мм) с искусственно созданным внутренним дефектом в форме сплюснутого цилиндра радиусом 12,5 мм, глубиной залегания 2,5 мм и толщиной 0,3 мм изготовлена в лаборатории НК ОАО “ЦНИИ СМ”. Тепловизором получено изображение температурного поля поверхности при ТНК (рис. 2). С использованием программного модуля ПМК “TSHCSS3D” построена система контуров (рис. 3) и определена предварительная форма дефекта в плане (окружность).



Рис. 2. Тепловизионное изображение температурного поля на поверхности пластины с дефектами

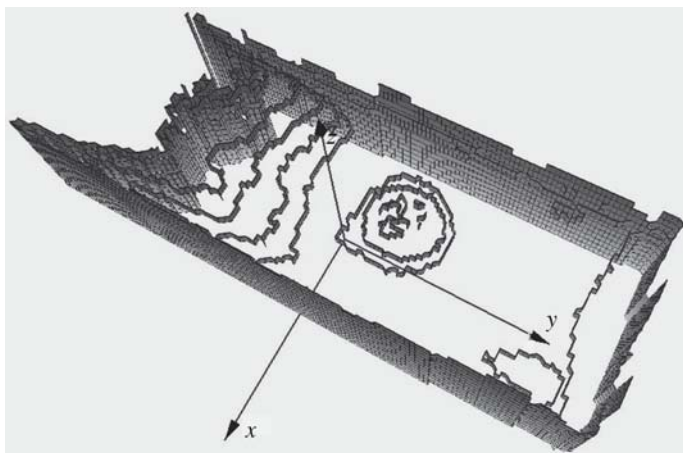


Рис. 3. Система контуров для исследуемой области с дефектом

Далее, с помощью методики предварительного распознавания формы трехмерных дефектов к имеющейся конечно-элементной модели части диагностируемой пластины (рис. 4) для поля пробных дефектов (рис. 5) получены решения H_D (рис. 6, 7) и “оптимальный” пробный дефект, вид которого приведен на рис. 8. Применение к найденной дефектной области методик распознавания формы трехмерных дефектов позволяет отнести данный дефект к внутренним расслоениям сплюснутой цилиндрической формы с размерами: радиус 12,97 мм, толщина 0,5 мм, глубина залегания 2,5 мм).

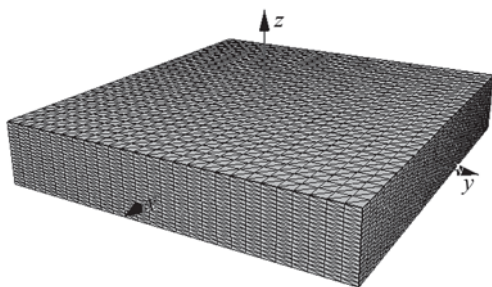


Рис. 4. Расчетная конечно-элементная сетка (78624 элемента)

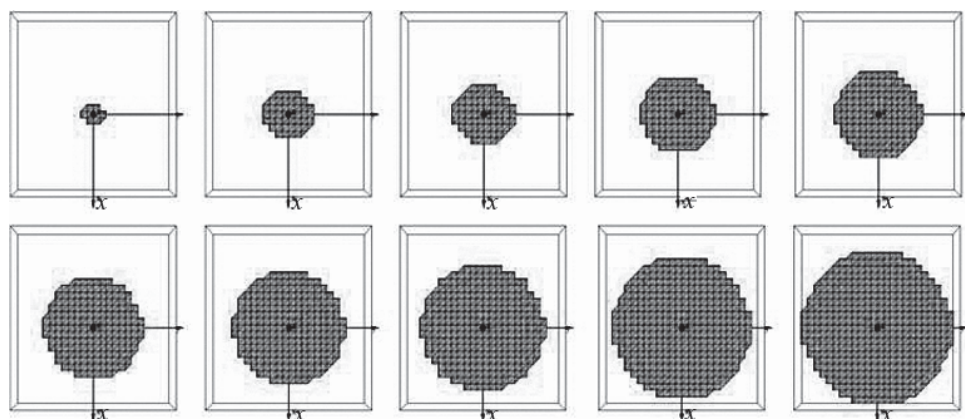


Рис. 5. Поле пробных дефектов (в плане)

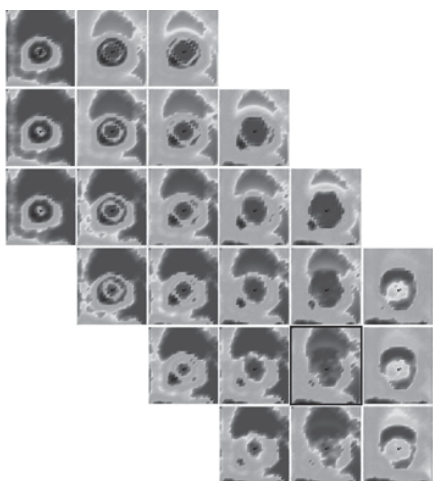


Рис. 6. Рассчитанные решения H_D для поля пробных дефектов толщиной 0,5 мм

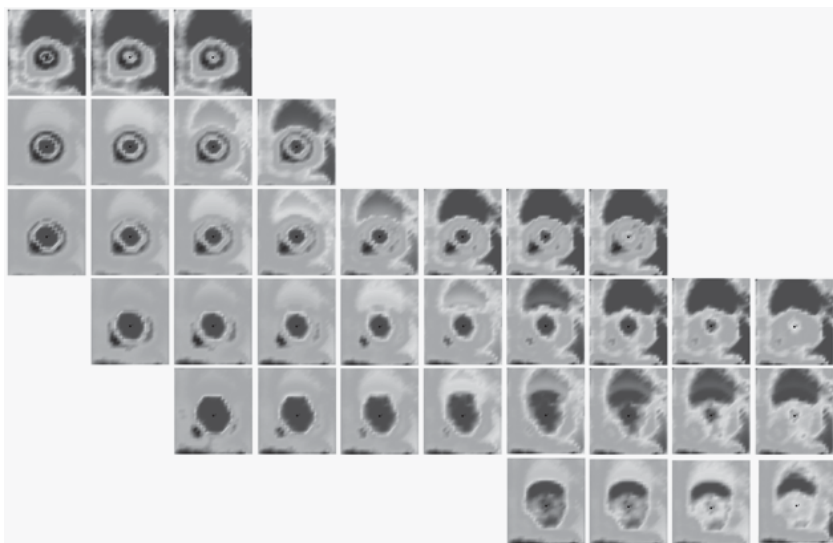


Рис. 7. Рассчитанные решения H_D для поля пробных дефектов толщиной 1 мм

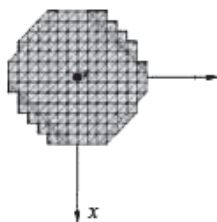


Рис. 8. Распознанный “оптимальный” пробный дефект (толщина 0,5 мм, описывающий радиус 14,5 мм, глубина залегания 2,5 мм)

Дадим оценку вычислительной эффективности разработанной технологии применительно к данному примеру, считая, что наиболее длительный этап — предварительное распознавание формы дефектов. Общее число пробных дефектов для построенной конечно-элементной сетки равно 1360. “Оптимальный” дефект получен решением для 60 пробных дефектов, что составляет 4,4% от общего числа пробных дефектов и является хорошим показателем вычислительной эффективности разработанной методики при данном уровне точности.

Выводы. Разработана автоматизированная технология распознавания трехмерных дефектов в композитных элементах конструкций по тепловизионным изображениям, позволяющая с высокой точностью идентифицировать трехмерную форму и тип дефектов. Результаты экспериментальных исследований с реальными композит-

ными образцами подтвердили работоспособность разработанной технологии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты № 07-08-00574-а и № 09-08-00323-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журавлев Ю. И., Гуревич И. Б. Распознавание образов и распознавание изображений // Распознавание, классификация, прогноз. – 1989. – Т. 2, № 5. – С. 5–73.
2. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. – М.: Мир, 1976.
3. Klette R., Rosenfeld A. Digital geometry. Geometric methods for digital picture analysis. – San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 2004.
4. Розенфельд А. Распознавание и обработка изображений. – М.: Мир, 1987.
5. Фурман Я. А. Введение в контурный анализ. Приложения к обработке изображений и сигналов. – М.: Физматлит, 2003. – 592 с.
6. Николаев А. А. Распознавание неоднородностей, определение их геометрических характеристик и построение 3D геометрических моделей в задачах неразрушающего контроля // Всеросс. конф. ММРО-13. – М.: МАКС Пресс, 2007. – С. 506–508.

Статья поступила в редакцию 6.10.2009

Юрий Иванович Димитриенко родился в 1962 г., окончил в 1984 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой “Вычислительная математика и математическая физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана, действительный член академии инженерных наук. Автор более 150 научных работ в области вычислительной механики, нелинейного тензорного анализа, термомеханики композитов, математического моделирования в материаловедении.



Yu.I. Dimitrienko (b. 1962) graduated from the Lomonosov Moscow State University in 1984. D. Sc. (Phys.-Math.), professor, head of Computational Mathematics and Mathematical Physics department of the Bauman Moscow State Technical University. Member of the Russian Academy of Engineering Sciences. Author of more than 150 publications in the field of computational mechanics, nonlinear tensor analysis, thermomechanics of composite materials, mathematical simulation in material science.

Андрей Анатольевич Николаев родился в 1981 г., окончил в 2004 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант, ассистент кафедры “Вычислительная математика и математическая физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 36 научных работ в области вычислительной математики, распознавания образов, механики сплошной среды, технической диагностики, геоинформационных технологий.



A.A. Nikolaev (b. 1981) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2004. Post-graduate and assistant lecturer of Computational Mathematics and Mathematical Physics department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 36 publications in the field of computational mathematics, pattern recognition, mechanics of continua, technical diagnostics, geoinformation technologies.

Игорь Константинович Краснов родился 1949 г., окончил в 1973 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Вычислительная математика и математическая физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных работ в области математических методов прогнозирования долговечности и надежности элементов конструкций, разработки методов математического моделирования.

I.K. Krasnov (b. 1949) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1973. Ph. D. (Eng.) senior lecturer of Computational Mathematics and Mathematical Physics department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 40 publications in the field of mathematical methods of forecasting of durability and reliability of elements of designs, development of methods of mathematical modeling.

ЖУРНАЛ “ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА имени Н.Э. БАУМАНА”

В журнале публикуются наиболее значимые результаты фундаментальных и прикладных исследований и совместных разработок, выполненных в МГТУ имени Н.Э. Баумана и других научных и промышленных организациях.

Журнал “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана” в соответствии с постановлением Высшей аттестационной комиссии Федерального агентства по образованию Российской Федерации включен в перечень периодических и научно-технических изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.

Главный редактор журнала “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана” — Президент МГТУ имени Н.Э. Баумана, академик РАН, д-р техн. наук, профессор И.Б. Федоров.

Журнал издается в трех сериях: “Приборостроение”, “Машиностроение”, “Естественные науки” с периодичностью 12 номеров в год.

В серии “Естественные науки” (главный редактор серии — д-р физ.-мат. наук профессор А.Н. Морозов) публикуются материалы по следующим основным направлениям:

- математика;
- механика;
- физика;
- информатика, вычислительная техника и управление.

Подписку на журнал “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана” можно оформить через агентство “Роспечать”.

Подписка по каталогу “Газеты, журналы” агентства “Роспечать”

Индекс	Наименование серии	Объем выпуска	Подписная цена (руб.)	
		Полугодие	3 мес.	6 мес.
72781	“Машиностроение”	2	250	500
72783	“Приборостроение”	2	250	500
79982	“Естественные науки”	2	250	500