

**МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ  
ДЕФЕКТОВ ТИПА ТРЕЩИН В КОНСТРУКЦИЯХ\***

*Разработан метод распознавания трехмерных дефектов на основе контурного анализа для систем технического машинного зрения в задачах неразрушающего контроля магнитным и тепловым методами. Предложена и реализована автоматизированная технологическая цепочка построения 3D геометрической модели обнаруженных неоднородностей на фоне модели объекта контроля. Разработаны элементы программно-математического обеспечения расшифровки зашумленных изображений и построения геометрической модели, ориентированные на работу в реальном времени.*

В настоящее время имеется ряд методов неразрушающего контроля для диагностирования дефектов [1]. На основе этих методов созданы диагностические комплексы (например, “КОМПЛЕКС-2.05” компании ООО “Институт “ДИМЕНС-тест” или “Марс” компании ООО “Ханк”), состоящие из аппаратной и программной частей. Результатом работы диагностических комплексов чаще всего является матричный набор параметров измерения (рис. 1) [2–4].

Так, например, для неразрушающего магнитного метода диагностирования такими параметрами могут быть магнитная индукция, магнитный поток и напряженность магнитного поля, а для неразрушающего теплового метода — распределения температуры по всей поверхности объекта контроля.

По визуализированному матричному набору (рис. 2) исследуемого параметра оператору предлагается определить наличие дефектов и их геометрические размеры. Часто такие изображения поступают оператору в реальном времени, т.е. в достаточно быстром темпе, и являются несовершенными — обладают недостаточной относительно фона контрастностью, четкостью, искажены помехами и шумами. Поэтому по таким сигналам оператор часто затрудняется принять правильное решение, а системы машинного зрения, основанные на традиционном подходе обработки каждой точки изображения и имеющие низкую зрительную эффективность по сравнению с человеком, “пересыщаются”, обрабатывая непомерные объемы данных.

---

\* Данная работа является составной частью разрабатываемой авторами и коллективом кафедры “Вычислительная математика и математическая физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана автоматизированной технологии распознавания дефектов в машиностроительных конструкциях и оценки безопасности их эксплуатации.

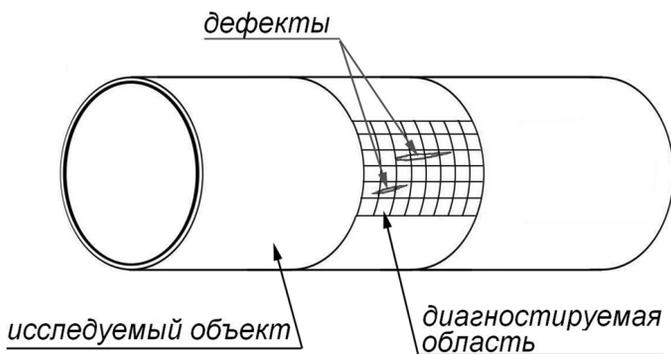


Рис. 1. Диагностируемая область исследуемого объекта в матричном представлении

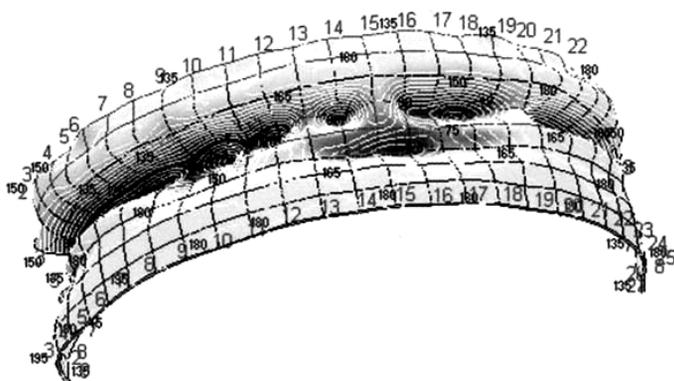


Рис. 2. Пример отфильтрованного матричного набора параметра измерения

Решением проблемы построения автоматизированной системы выявления и классификации неоднородностей, создания 3D геометрической модели контролируемого изделия с обнаруженными неоднородностями, работающей в режиме реального времени, может быть разработанный и описанный в данной работе комплексный метод. Он основан на контурном анализе, который заключается в отказе от обработки каждой точки изображения и переходе к обработке его контуров [5], т.е. переходе от растрового зашумленного изображения к векторному.

**Задача построения 3D геометрической модели неоднородностей и представление неоднородностей как системы контуров** на фоне геометрической модели (ГМ) объекта контроля — это задача компьютерного зрения. Пусть имеется изображение, получаемое в режиме реального времени. В рассматриваемых методах неразрушающего контроля (магнитном и тепловом) задачей предобработки часто является задача подавления шума (например, в [2] используются медианные фильтры). В разрабатываемой системе к задачам предобработки относятся также адаптивная бинаризации и морфологическое расширение.

В качестве задачи извлечения признаков рассматривается задача выделения контуров. Для выделения контуров использованы алгоритмы “Жука” [6, 7], Розенфельда [8] и метод активных контуров [9]. К задаче обнаружения неоднородностей (дефектов) относится обнаружение объектов; в настоящей работе она рассматривается как задача распознавания зашумленных контуров, а построение ГМ неоднородности — как задача анализа характеристик объекта. Исследуемые эталонные ГМ дефектов представляются в виде классов систем эквализированных контуров — набора линий уровней, которые путем пространственной триангуляции преобразуются в набор граней, описывающих дефект.

**Задача классификации дефектов как задача распознавания зашумленных контуров** (в обозначениях работы [5]) рассматривается на примере двух классов (часто можно ограничиться моделью дефектов (контуров) в виде продольной трещины и эллипсовидной раковины) с использованием действительного координатного пространства  $E^{2k}$  и комплекснозначного пространства  $C^k$  [5]. Пусть  $\Gamma_{(1)}^{(c)} = \{\gamma_{(1)}(n)\}_{0,k-1}$  и  $\Gamma_{(2)}^{(c)} = \{\gamma_{(2)}(n)\}_{0,k-1}$  — эталонные контуры классов  $A_1$  и  $A_2$ , где  $\gamma_j(n)$  —  $n$ -й вектор  $j$ -го контура ( $j = 1, 2$ ), представленного в комплекснозначном виде [1] и состоящего из  $k$  векторов. На устройство распознавания подается либо зашумленный контур первого класса, равный  $N_1 = \Gamma_{(1)}^{(c)} + Z$ , либо второго класса, равный  $N_2 = \Gamma_{(2)}^{(c)} + Z$ , где  $Z$  — шумовой контур и

$$\Gamma_{(1)}^{(c)} = |\mu_{(1)}| \exp \{i\Delta\varphi_{(1)}\} \{\gamma_1(n + d_{(1)})\}_{0,k-1};$$

$$\Gamma_{(2)}^{(c)} = |\mu_{(2)}| \exp \{i\Delta\varphi_{(2)}\} \{\gamma_2(n + d_{(2)})\}_{0,k-1}.$$

Параметры: масштаб  $|\mu|$ , поворот  $\Delta\varphi$  и сдвиг  $d$  для каждого контура предполагаются неизвестными.

Задача распознавания состоит в обоснованном отнесении зашумленного контура  $N$  к одному из классов:  $A_1$  или  $A_2$ . Для принятия решения необходимо сформировать безусловное отношение правдоподобия и сравнить его с пороговым значением. Функции правдоподобия контуров  $N_1$  и  $N_2$  имеют соответственно вид

$$\Lambda_c(N, |\mu_{(1)}|, \Delta\varphi_{(1)}, d_{(1)}) = c \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} [\|N\|^2 + \left\| \Gamma_{(1)}^{(c)} \right\|^2 - 2 \operatorname{Re}(N, \Gamma_{(1)}^{(c)})] \right\};$$

$$\Lambda_c(N, |\mu_{(2)}|, \Delta\varphi_{(2)}, d_{(2)}) = c \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} [\|N\|^2 + \left\| \Gamma_{(2)}^{(c)} \right\|^2 - 2 \operatorname{Re}(N, \Gamma_{(2)}^{(c)})] \right\},$$

где  $\sigma^2$  — дисперсия шумового контура  $Z$ .

Тогда логарифм условного отношения правдоподобия  $L$  можно записать в следующем виде:

$$\ln [L(N, |\mu_{(1)}|, |\mu_{(2)}|, \Delta\varphi_{(1)}, \Delta\varphi_{(2)}, d_{(1)}, d_{(2)})] =$$

$$= -\frac{1}{2\sigma^2} \left[ \left\| \Gamma_{(1)}^{(c)} \right\|^2 + \left\| \Gamma_{(2)}^{(c)} \right\|^2 - 2[\operatorname{Re}(N, \Gamma_{(1)}^{(c)})] - \operatorname{Re}(N, \Gamma_{(2)}^{(c)}) \right].$$

Для нахождения оценок  $|\mu_{(1)}|, |\mu_{(2)}|, \Delta\varphi_{(1)}, \Delta\varphi_{(2)}, d_{(1)}, d_{(2)}$  используется метод максимального правдоподобия (МП). Подаваемый зашумленный контур сравнивается с эталонным контуром  $\Gamma_{(1)}^{(c)}$ , методом МП строятся оценки. Аналогичные действия выполняются с эталонным контуром  $\Gamma_{(2)}^{(c)}$ .

Использование оценок параметров  $\Delta\hat{\varphi}_{(1)}$  и  $\Delta\hat{\varphi}_{(2)}$  [10] позволяет свести задачу к задаче распознавания полностью известных контуров со следующим правилом принятия решения в пользу класса  $A_1$ :

$$\operatorname{Re}(N, \Gamma_{(1)}^{(c)}) - \operatorname{Re}(N, \Gamma_{(2)}^{(c)}) \stackrel{A_1}{\geq} U_{1,2},$$

где  $U_{1,2} = \sigma^2 \ln \Lambda_0 + 0,5 \left( \left\| \Gamma_{(1)}^{(c)} \right\|^2 + \left\| \Gamma_{(2)}^{(c)} \right\|^2 \right)$ ,  $\operatorname{Re}(N, \Gamma_{(1)}^{(c)})$  и  $\operatorname{Re}(N, \Gamma_{(2)}^{(c)})$  — действительные компоненты скалярного произведения соответствующих контуров.

**Задача классификации дефектов как задача распознавания зашумленных контуров.** В соответствии с работами [5, 6], устройство распознавания содержит набор из  $M$  фильтров, каждый из которых согласован с одним из эталонных сигналов алфавита. Пусть  $\Gamma_{(j)}^{(c)} = |\mu_{(j)}| \exp\{i\Delta\varphi_{(j)}\} \{\gamma_{(j)}(n + d_j)\}_{0,k-1}$  — сигнальный контур, состоящий из  $k$  векторов и полученный путем преобразований (поворота, масштабирования и сдвига) из исходного эталонного контура  $\Gamma_{(j)} = \{\gamma_{(j)}(n)\}_{0,k-1}$  класса  $A_j$ , где  $j = 1, \dots, M$ ,  $M$  — общее число классов распознаваемых контуров и  $\gamma_{(j)}(n)$  —  $n$ -й вектор  $j$ -го контура в комплекснозначном представлении [5]. Скалярные параметры: масштаб  $|\mu_{(j)}|$ , поворот  $\Delta\varphi_{(j)}$  и сдвиг  $d_{(j)}$  для каждого контура предполагаются неизвестными. Подаваемый на вход устройства распознавания зашумленный контур имеет вид  $N_{(j)} = \Gamma_{(j)}^{(c)} + Z$ , где  $Z$  — шумовой контур с дисперсией  $\sigma^2$ . Параметры масштаб, поворот и сдвиг оцениваются методом МП. Для распознавания строятся контурные согласованные фильтры (КСФ) [5, 11] для алфавита эталонных контуров из  $M$  классов  $A_1, \dots, A_M$ . Решающее устройство определяет номер фильтра с максимальным по модулю выходным сигналом, и при превышении порогового уровня выносится решение в пользу класса, номер которого совпадает с номером фильтра (рис. 3). После выбора номера класса решается задача об отнесении контура к зашумленному или шумовому [5, 12–14]. Правило обнаружения зашумленного контура имеет вид

$$|\eta(d)|_{\max} > \sqrt{2} \|\Gamma\| \sqrt{\ln \Lambda_0} = U_{|\mu|},$$

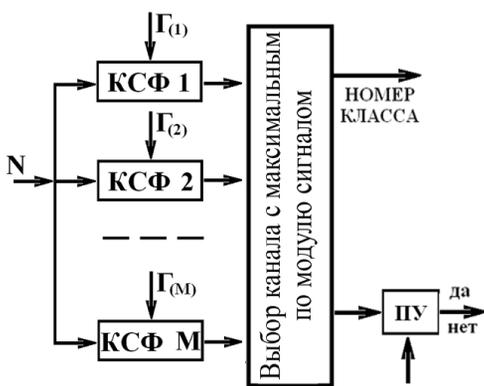


Рис. 3. Структура программного устройства распознавания образов для алфавита из  $M$  классов (ПУ – пороговое устройство)

вание количественной меры схожести между фильтруемым контуром  $N$  и эталонной формой, определяемой контуром  $\Gamma$ . Часто бывает, что эталонные формы имеют ряд общих признаков, связанных с некоторыми общими свойствами, например: прямолинейность линии фрагмента контура, симметричность элементарных векторов, степень правильности задаваемой контуром фигуры и т.п. При наличии таких общих признаков можно говорить о классах форм, и появляется возможность учесть закономерности определенного класса форм в выражении для КСФ. В результате такой КСФ будет вырабатывать меру схожести с эталоном не для одного конкретного контура, а для целого класса контуров с общими свойствами.

Для идентификации также можно использовать следующие характеристики формы фигуры: коэффициент формы, определяемый как отношение квадрата периметра контура к площади; ширину фигуры (трактуемую в смысле ширины текущей горизонтали контура и как минимальное расстояние между противоположными сторонами) [5, 7]; модуль нормированного скалярного произведения эталонного и распознаваемого контуров [5].

В данной работе для построения геометрической модели дефекта прежде всего используются следующие найденные параметры: координаты геометрического центра масс, найденный класс эталонных контуров, параметры масштаба  $|\mu|$  и поворот  $\Delta\varphi$ .

**Построение 3D геометрических моделей обнаруженных неоднородностей на фоне модели объекта контроля.** Входной информацией данной задачи являются результаты предыдущей задачи — линии уровней, полученные путем разбиения исходного изображения на

где  $U_{|\mu|}$  — величина, зависящая от оценки масштаба контура, уровня шумов, допустимых рисков и априорных вероятностей классов. Таким образом, результатами данной задачи являются номер класса эталонного контура и найденные геометрические параметры: координаты геометрического центра масс, оценки параметров масштаба  $|\mu|$  и поворота  $\Delta\varphi$ .

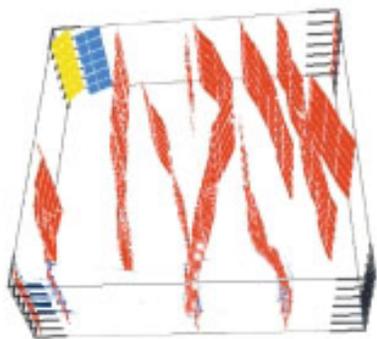
**О геометрических параметрах контуров (дефектов).** Контурные согласованные фильтры обеспечивают образо-

уровни, выделения из них контуров и отнесения к одному из классов. Данные контура характеризуются классом, к которому принадлежит контур, а также координатами геометрического центра масс, параметрами оценок масштаба  $|\hat{\mu}_{z_i}|$  и угла ориентации  $\Delta\hat{\varphi}_{z_i}$ , где индекс  $z_i$  означает номер уровня. В отличие от зашумленных выделенных контуров, имеющих большое количество точек, или от зашумленной исходной матрицы параметра измерения, получаемые распознанные контуры имеют сравнительно небольшое количество точек. Входные линии уровней (система контуров) подаются на вход процедуре пространственной триангуляции, работающей на основе триангуляции Делоне, проводится разбиение и создание набора граней (треугольников), описывающих неоднородность (дефект). Поверхность неоднородностей, описанная таким образом, занимает небольшой объем памяти (в смысле хранения) и является достаточно универсальной.

**Комплекс программно-математического обеспечения (ПМО) для решения задач классификации контуров (дефектов) и определения их геометрических параметров.** В соответствии с теориями распознавания образов и контурного анализа [5] на основе представленных зависимостей разработан комплексный алгоритм распознавания для различных классов дефектов, включающий в себя следующие алгоритмы: выделения контуров [6–9], эквализации и стандартизации кодов контуров, огрубления контуров на основе метода получения выпуклого контура Грэхема и метода получения выпуклого контура Джарвиса, пересчета кодов контуров из действительного координатного пространства  $E^{2k}$  и комплекснозначного пространства  $C^k$ , оценки параметров линейных преобразований контуров, распознавания контуров в пространстве  $C^k$ , визуализации (в виде линий уровней, триангуляционной иррациональной и регулярной сеток).

На основе созданного алгоритма в среде Microsoft VS 7.0 разработаны элементы ПМО. На вход ПМО подается набор классов (дефектов), распознаваемая матрица результатов измерений, исходные данные для алгоритма принятия решений (априорные вероятности, значение отношения сигнал/шум и др.). Результатом работы комплекса ПМО является решение об отнесении распознаваемого контура к одному из классов и оценки линейных преобразований ( $|\hat{\mu}|$ ,  $\Delta\hat{\varphi}$ ,  $\hat{d}$  и смещение контура относительно начала координат) или решение о том, является ли распознаваемый контур шумовым. По обработанным данным программный модуль триангуляции выполняет построение 3D ГМ системы дефектов (рис. 4).

**Выводы.** Разработанный комплексный метод на основе теории распознавания образов является быстрым и позволяет создавать 3D ГМ систем неоднородностей (дефектов) на фоне ГМ объекта



**Рис. 4. Пример 3D модели системы трещин в квадратной пластине**

состояния и задачи прогнозирования остаточного ресурса исследуемых объектов контроля [15].

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 07-08-00574-а.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К л ю е в В. В. Неразрушающий контроль и диагностика. – М.: Машиностроение, 2005.
2. Б у д а д и н О. Н. Тепловой неразрушающий контроль изделий: Научно-методическое пособие. – М.: Наука, 2006. – 472 с.
3. К р а с н о в И. К., Н и к о л а е в А. А. Вычислительная диагностика дефектов типа трещины магнитным методом и прогнозирование их дальнейшего развития // Научные материалы Первой международной научно-технической конференции “Аэрокосмические технологии”. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – С. 144–146.
4. Н и к о л а е в А. А. Вычислительная диагностика дефектов типа трещины магнитным методом // Студенческий научный вестник. Сб. тезисов докладов общеуниверситетской научно-технической конференции “Студенческая научная весна – 2005”, 4–29 апреля 2005 г., МГТУ им. Н. Э. Баумана / Под ред. К.Е. Демихова. – М.: НТА “АПФН”, 2005. –Т. 2. –С. 222–223.
5. Ф у р м а н Я. А. Введение в контурный анализ. Приложения к обработке изображений и сигналов. – М.: Физматлит, 2003. – 592 с.
6. Д у д а Р., Х а р т П. Распознавание образов и анализ сцен. – М.: Мир, 1976.
7. K l e t t e R., R o s e n f e l d A. Digital geometry. Geometric methods for digital picture analysis. – San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 2004.
8. Р о з е н ф е л д А. Распознавание и обработка изображений. – М.: Мир, 1987.
9. B l a k e A., I s a r d M. Active Contours. – Springer-Verlag, 1998.
10. Ф о м и н Я. А., Т а р л о в с к и й Г. Р. Статистическая теория распознавания образов. – М.: Радио и связь, 1986. – 532 с.
11. С о с у л и н Ю. Г. Разрешение и распознавание радиосигналов: Уч. пособ. – М.: МАИ, 1983.
12. М а т е м а т и ч е с к и е аспекты классификации дефектов и определения их геометрических параметров при диагностировании магнитным методом // Информационно-математические технологии в экономике, технике и образовании. – 2006, Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2006. – С. 35–36.

13. Николаев А. А. Математические аспекты классификации дефектов для построения геометрической модели дефектов в оболочечном элементе // Информационно-математические технологии в экономике, технике и образовании. Вып. 3. Проблемы математического моделирования и информационно-аналитической поддержки принятия решений. Сб. материалов Международной научной конференции – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2007. – С. 46–50.
14. Николаев А. А. Распознавание неоднородностей, определение их геометрических характеристик и построение 3D геометрических моделей в задачах неразрушающего контроля // Математические методы распознавания образов: 13-я Всероссийская конференция. г. Зеленогорск, 30 сентября–6 октября 2007 г.: Сб. докладов. – М.: МАКС Пресс, 2007. – С. 506–508.
15. Дмитриенко Ю. И., Николаев А. А., Краснов И. К. Разработка автоматизированных технологий неразрушающего контроля для оценки остаточного ресурса неметаллических конструкций // Четвертая Международная научно-практическая конференция “Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности” (Научно-технологические, экономические, юридические, политологические, социальные и международные аспекты) 2–5 октября 2007 г., СПб: Сб. трудов конференции. СПб: Персон, 2007. – С. 267–272.

Статья поступила в редакцию 10.10.2007

Игорь Константинович Краснов родился в 1949 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1973 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Вычислительная математика и математическая физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 30 научных работ в области математических методов прогнозирования долговечности и надежности элементов конструкций, математического моделирования.

I.K. Krasnov (b. 1949) graduated from the Moscow Higher Technical School in 1973. Ph. D. (Eng.), assoc. professor “Computational Mathematics and Mathematical Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 30 publications in the field of mathematical methods of predicting service life and reliability of members of constructions, mathematical simulation.

Андрей Анатольевич Николаев родился в 1981 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2004 г. Аспирант кафедры “Вычислительная математика и математическая физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 15 научных работ в области вычислительной математики, распознавания образов, механики сплошной среды и технической диагностики.

A.A. Nikolaev (b. 1981) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2004. Post-graduate of “Computational Mathematics and Mathematical Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 15 publications in the field of computational mathematics, recognition of images, mechanics of continuum and technical diagnostics.