

## Параллельные технологии в задаче идентификации и анализа коррозионной трещины

М.Р. Еникеев, И.М. Губайдуллин

Институт нефтехимии и катализа РАН

В данной работе рассматривается проблема идентификации и анализа дефектов в смежных задачах изучения зарождения коррозионного растрескивания под напряжением (КРН), а также использования параллельных вычислений для повышения скорости обработки и анализа входных данных для этого типа задач. Приведен анализ экспериментов по коррозионным трещинам.

### 1. Введение

Современное развитие химической промышленности, разработка новых технологических процессов, протекающих в агрессивных средах, предъявляют высокие требования к конструкционным материалам. Наиболее важными конструкционными материалами являются металлы и их сплавы. В процессе эксплуатации изделий, вследствие химического или электрохимического взаимодействия их с окружающей средой происходит коррозия [1].

Процессы коррозии необратимы и часто приводят к отказам различных машин и аппаратов, металлоконструкций, в связи с этим, их необходимо обнаруживать на ранних стадиях, давать количественную оценку коррозионного повреждения, прогнозировать опасность развития в случае непринятия мер по усилению коррозионной защиты. Установление причин коррозионного разрушения позволяет правильно выбрать метод защиты.

Сложность задачи исследования, сложность и разнообразие коррозионной среды и условий коррозии заставляют разрабатывать систему методов исследования и испытаний, которая позволяла бы ответить на поставленные теорией и практикой вопросы.

По способу оценки методы исследования коррозии металлов подразделяются на количественные и качественные.

Среди количественных методов исследования коррозии часто применяют весовой, объемный, электрохимический, магнитометрический и другие методы. Одним из главных недостатков этих подходов является относительная трудоемкость проведения анализа и невозможность применить эти методы вне лабораторных условий. Качественные методы испытания не дают полной характеристики стойкости металлов, но позволяют установить характер и интенсивность коррозионного процесса [2].

С точки зрения визуальных методов оценки, как и большинство природных явлений, коррозия по существу является сложной и нерегулярной, поэтому морфология и изображения поверхности, подвергшейся коррозионному разрушению, не могут быть совершенно идентичными даже в случае использования одного и того же материала и коррозионной среды. Еще одна особенность, которая затрудняет анализ коррозии с помощью визуальных методов, – это широкое разнообразие объектов для анализа при оценке коррозии. Например, в зависимости от коррозионной среды, механизма коррозионного процесса, характера дополнительных воздействий на корродирующий металл в процессе его взаимодействия с внешней средой возможны различные процессы образования коррозии: кавитационная коррозия, питтинговая коррозия, коррозионное растрескивание под напряжением. Критерии анализа на основе изображений для данных процессов будут кардинально отличаться.

Таким образом, подведем итоги: изображения прокорродированного металла нерегулярны и невоспроизводимы. Разработка математической модели, позволяющей количественно описывать процессы на межфазных границах в широком ряду испытательных сред и металлов, и основанной на обработке изображений прокорродированной поверхности, даст возможность более полного использования методов визуального контроля и более глубокого понимания механизмов реакций на межфазных границах. Системой, реализующей такую модель, может быть система компьютерного зрения.

Для задачи визуального контроля за экспериментом можно выделить общую схему поиска повреждений поверхности:

- 1) Предварительная обработка изображения.
- 2) Сегментация изображения.
- 3) Анализ параметров дефектов

Рассмотрим содержание этой подробно для коррозионного растрескивания под напряжением.

## 2. Задача поиска объектов: питтинговая коррозия

Оценка коррозионного растрескивания под напряжением состояло в анализе входных данных в виде изображений трубной стали X70 в различных растворах (рис. 1). В качестве критерия оценки трещины на образце стали использовалась фрактальная размерность. Целью обработки серии изображений был поиск взаимосвязи между структурными изменениями трещины и с химическим и механическим воздействием на неё.



Рис. 1. Примеры входных данных для трубной стали X70

В качестве предварительной обработки изображения использовались фильтры шумоподавления и фильтры повышения контрастности и чёткости. В частности, для повышения четкости использовался метод линейной растяжки гистограммы, который имеет следующий вид:

$$\begin{cases} b = 255 / (\max - \min) \\ a = -b * \min \end{cases}$$
$$\text{dst}(x, y) = a + b * \text{src}(x, y),$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты растяжения,  $\max$  и  $\min$  – соответственно максимальное и минимальное значения яркости на изображении,  $\text{src}$  и  $\text{dst}$  – исходное и обработанное изображения соответственно.

В качестве фильтра шумоподавления использовался медианный фильтр. Благодаря своим характеристикам медианный фильтр при оптимально выбранной апертуре (размер окна фильтра) может сохранять без искажений резкие границы объектов, подавляя некоррелированные и слабо коррелированные помехи и малоразмерные детали. В аналогичных условиях алгоритмы линейной фильтрации неизбежно "размывают" резкие границы и контуры объектов (рис. 2).

После проведения операции шумоподавления, поиск трещины для анализа можно осуществлять различными способами. Эта задача сводится к поиску границы на изображении, в данном случае можно наблюдать резкое изменение яркости. Такую задачу можно решать например, детектором границ Кенни. Так как этот детектор восприимчив к шуму, можно привести входные изображения к бинарному виду, и разделить все входные пиксели изображения на "сигнал" и "шум".

Существуют различные подходы к бинаризации, которые условно можно разделить на 2 группы: пороговые и адаптивные. Пороговые методы бинаризации оперируют всем изображе-

нием, используя характеристику (порог), позволяющую разделить все изображение на две области. Адаптивные методы работают с участками изображений и используются при неоднородном освещении объектов. В нашем случае освещение нельзя назвать неоднородным, поэтому использовалась пороговая бинаризация.



**Рис. 2.** Применение медианного фильтра. Левое изображение – до применения фильтра, правое – после

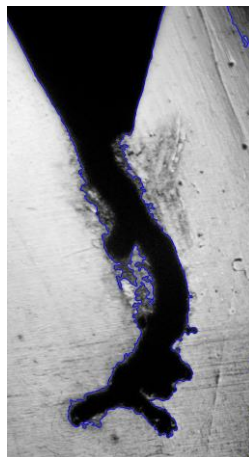
Для определения оптимального порога бинаризации предложено большое количество различных подходов. Наиболее удачным из них представляется подход Otsu [3], который предполагает не только определение оптимального порога бинаризации, но и вычисление некоторого критерия бимодальности, то есть оценку того, действительно ли исследуемая гистограмма содержит именно два выраженных пика.



**Рис. 3.** Применение операции бинаризации по Отсу

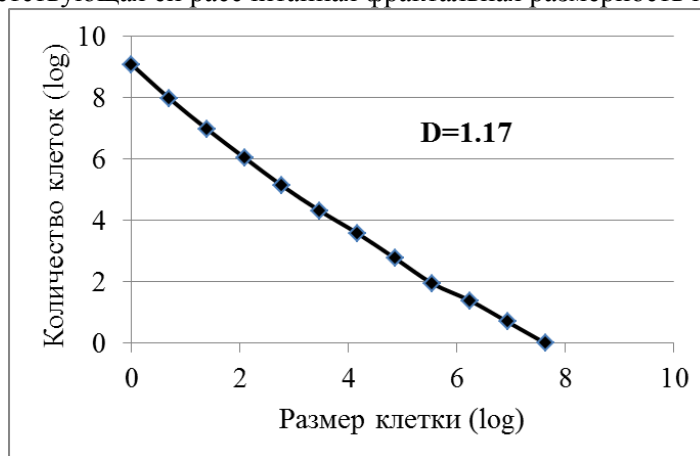
Применение операции бинаризации для входного изображения отображено на рис. 3. Таким образом получаем бинарное изображение, которое явным образом задаёт границы объекта. Вот эта совокупность пикселей, составляющих границу объекта и есть контур объекта. Чтобы оперировать полученным контуром, его необходимо как-то представить (закодировать). В данном случае использовался метод, упоминаемый во второй главе данной работы, цепной код Фримена.

Выделив контуры на изображении и отфильтровав контуры слишком малого размера, получим искомый профиль трещины (рис. 4).



**Рис. 4.** Профиль трещины после проведения операции распознавания

Характеристика коррозионного растрескивания велась при помощи фрактального анализа. Для образца стали при растрескивании была рассчитана фрактальная размерность. На рисунке 8 представлен образец стали с выделенной границей, осуществленной с помощью приведенных выше методов, и соответствующая ей рассчитанная фрактальная размерность на рисунке 5.



**Рис. 5.** Фрактальная размерность образца коррозионного растрескивания под напряжением

Для образца стали при растрескивании была рассчитана фрактальная размерность. На рисунке 6 можно увидеть образец стали с выделенной границей, осуществленной с помощью приведенных выше методов, и соответствующую ей рассчитанную фрактальную размерность на рисунке 6.

Обработка серии экспериментов анализа коррозионного растрескивания трубной стали X70 проводилась для различных растворов [4].

**Таблица 1.** Растворы для анализа коррозионного растрескивания трубной стали X70

Состав раствора	Наименование	Скорость
Фон + 1мМ Na <sub>2</sub> S	Образец 5	0,18
Фон	Образец 17	0,13
Фон + 10 мМ Mg(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	Образец 20	0,62
Фон + 30 мМ NaHCO <sub>3</sub>	Образец 21	0,14
NS <sub>4</sub> + боратный буфер	Образец 22	0,4

NS <sub>4</sub> + 50 мМ Mg(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	Образец 23.	0,62
Фон + 1 мМ Na <sub>2</sub> S	Образец 26	0,17

Целью анализа являлось установление взаимосвязи скорости роста трещины и её фрактальной размерности. В первоначальных входных данных, для каждого образца раствора, существовало несколько наборов изображений, различных участков трещины. На рисунке 6 отображены входные данные соответствующие образцу №5.

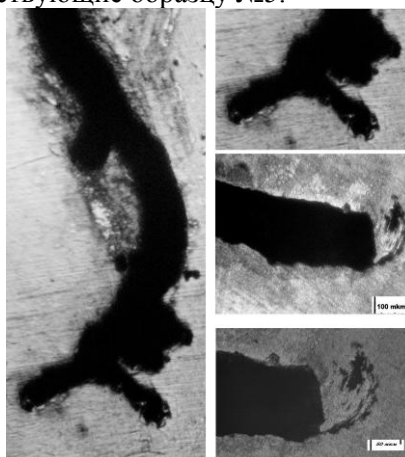
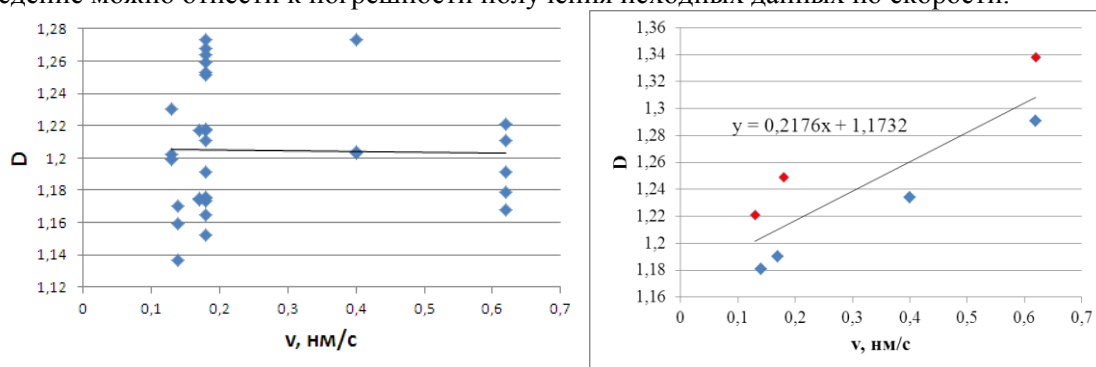


Рис. 6. Пример набора входных данных для образца 5

Был проведен расчет по входным данным для всех представленных образцов, используя алгоритмы распознавания описанные в данной работе. Результат расчета представлен на рисунке 7а. Проанализировав данный результат, было предположено, что данная хаотичная "корреляция" обусловлена тем, что трещина представляет собой объект, состоящий из трех под-объектов: часть вырезанная лобзиком, усталостная трещина и коррозионная трещина. Для того чтобы получить корреляцию между скоростью роста трещины и её фрактальной размерностью, необходимо использовать только участки коррозионной трещины. Как можно заметить из рисунка 7б, данные по взаимосвязи можно разделить на два кластера (выделены синим и красным), такое поведение обсуждается, возможно, что оно зависит от раствора, в которой реагирует трубная сталь, с другой стороны, с учетом относительно малого количества входных данных, это поведение можно отнести к погрешности получения исходных данных по скорости.



## Уровень параллелизма данных

Название модели "параллелизм данных" происходит оттого, что параллелизм заключается в применении одной и той же операции к множеству элементов данных. В нашем случае, этой моделью удобно пользоваться для набора кадров. Для параллельной обработки кадров удобно использовать такую технологию программирования, как OpenMP.

## Уровень распараллеливания алгоритмов

Следующий уровень, это распараллеливание отдельных процедур и алгоритмов. Сюда можно отнести алгоритмы фильтрации изображения, обработки, выделения объектов изображения по типам и т. д. На этом уровне абстракций удобно использовать такую технологию, как OpenCV в связке с GPU.

Для параллельной обработки GPU модуль OpenCV содержит в себе несколько уровней функциональности. На нижнем уровне находятся реализации служебных операций, таких как инициализация и управление GPU, работа с памятью, механизм асинхронных вызовов. Уровнем выше реализован широкий набор базовых функций обработки изображений: различные методы фильтрации, поиск максимума, аффинные преобразования, вычисление разности изображений в различных нормах и т.д. Список этих алгоритмов постоянно обновляется, в целом они призваны облегчить разработку алгоритмов компьютерного зрения самого высокого уровня.

В OpenCV контейнером для хранения данных (в том числе изображений) служит класс Mat. По аналогии в GPU модуле реализован класс GpuMat, практически с той же функциональностью, но хранящий данные в видеопамяти. Библиотека OpenCV предоставляет удобные средства обмена информацией между GPU и CPU. Основную часть GPU модуля составляют функции, имеющие интерфейс, идентичный CPU части OpenCV, с тем лишь отличием, что они принимают на вход объект типа GpuMat. Программный интерфейс модуля (API) создан максимально близким к интерфейсу CPU части OpenCV, что облегчает перенос существующего кода на GPU. Однажды загрузив изображение на видеокарту, можно использовать различные функции обработки, которые будут производиться целиком на видеокарте.

Плюсом данного метода является простота реализации и удовлетворительный результат времени ускорения расчета для экспериментатора. В целом для задачи анализа КРН ускорение составило 4.5 раза.

## Литература

1. Еникеев М.Р., Малеева М.А., Губайдуллин И.М. Исследование механизма развития коррозионных поражений с использованием компьютерного зрения // Журнал Средневолжского математического общества. 2013. Т. 15. № 3. С. 70-75
2. M. Weisner, J. Ihlemann H.H., Muller, E. Lankenau, G. Huttmann Optical coherence tomography for process control of laser micromachining // Review of Scientific Instruments. 2010, Т. 81 №3, 033705.
3. N. Otsu. «A threshold selection method from gray-level histograms». IEEE Trans. Sys., Man., Cyber. 9, 1979, p.: 62-66.
4. Богданов Р. И. Закономерности коррозионного растрескивания под напряжением трубной стали X70 в грунтовых электролитах с pH близким к нейтральному : дис. канд. хим. наук : 05.17.03 - М. 2012.- 196 с.
5. Еникеев М.Р., Сайфуллина Л.С., Губайдуллин И.М. Использование технологии параллельных вычислений при разработке прибора автоматического контроля параметров детали сложной геометрической формы // В сборнике: Параллельные вычислительные технологии (ПАВТ'2012) Труды международной научной конференции. Ответственные за выпуск: Л.Б. Соколинский, К.С. Пан. 2012. С. 721.