

А.А. ФОМИН

**Многомасштабная оценка балла  
зерна микроструктур**

УДК 004.932

Муромский институт  
(филиал) ФГБОУ ВПО  
«Владимирский  
государственный  
университет имени  
Александра  
Григорьевича и Николая  
Григорьевича  
Столетовых», г. Муром

*Предлагается алгоритм повышения качества контурного препарата снимка микроструктуры при решении задачи оценки балла зерна.*

*We propose an algorithm to improve the quality of the preparation of a contour image of the microstructure in solving the problem of estimating grain size.*

Основная часть отказов и разрушений металлоконструкций происходит по причине коррозии материалов. В данном случае предупреждение аварийных ситуаций часто осуществляется путем анализа изменений в химическом составе материалов, что позволяет определить качественные характеристики продукции.

Одним из подходов к анализу химического состава является количественная микроскопия, задачи которой часто решаются с применением средств визуализации и вычислительной техники.

При этом автоматизированное определение количества частиц, анализ их формы и процентного содержания [1] часто выполняется с использованием контурного препарата изображений микроструктур. Операции по подготовке образцов материалов [2] (шлифование, травление кислотой и т.п.), а также методы и средства визуализации (использование микроскопов, фото- и видеокамер) могут приводить к искажениям границ объектов изображений. Это может проявляться в наличии контурных шумов, изменении формы контурных линий или появлении всевозможных единичных выбросов и флуктуаций.

Очевидно, что искажение информации о контурах объектов приводит к снижению достоверности анализа микроструктуры. По-

этому требуется предобработка контурных линий, направленная на снижение влияния помех. Возможным методом обработки искаженных контуров является их сглаживание или фильтрация контурных шумов, что достигается использованием алгоритма многомасштабного сглаживания кривых [3, 4].

Пусть имеется изображение  $f[n, m]$ , описываемое множеством контуров, представленных множеством кривых  $\Gamma_i$ , т.е.

$$f[n, m] \equiv \{\Gamma_i\}, i \in \mathbf{Z}.$$

Каждая кривая может быть описана множеством точек, вида

$$\Gamma_i = \{[n, m]_k\}, k \in \mathbf{Z} \quad (1)$$

где  $[n, m]$  – координаты элемента кривой,  $k$  – номер элемента при последовательном обходе.

Для фильтрации объекта  $\Gamma$ , заданного по (1), необходимо представить его в виде, позволяющем выполнять подобные процедуры. Кривая  $\Gamma$  может быть описана множеством векторов координат ее элементов. Поскольку, рассматриваемые в данном случае, кривые  $\Gamma$  описывают форму особенностей  $\beta$  двумерных сигналов (изображений), то для их описания достаточно тройки векторов (одномерных дискретных сигналов),

$$\Gamma = (\gamma^n[k], \gamma^m[k], \gamma^z[k]), \quad (2)$$

соответствующих, например, координатам  $n$  и  $m$  изображения  $f[n, m]$  и значению яркости элемента кривой в точке  $[n, m]$ . В частном случае, возможно использование только пары векторов  $\gamma^n[k]$ ,  $\gamma^m[k]$ .

Многомасштабная фильтрация кривых может быть выполнена на основе использования вейвлет-преобразований, благодаря представлению кривых в виде (2).

Наиболее простым и очевидным подходом к фильтрации кривых  $\Gamma$  вида (2) на основе вейвлет-преобразований является разложение каждого из векторов  $\gamma[k]$  по базису вейвлетов и восстановление сигнала без учета высокочастотной составляющей, очевидно, содержащей информацию о шумах.

Для аппроксимации одномерного сигнала, в данном случае  $\gamma[k]$ , необходимо задать коэффициент сжатия  $\delta$ , на основе которого мо-

жет быть рассчитана ширина полосы пропускания  $\lambda = 1/\delta$  фильтра, реализуемого оператором  $C(\gamma[k], \delta)$ .

Оператор  $C(\gamma[k], \delta)$  реализуется следующим образом. Сначала вычисляется одномерно пакетное вейвлет-преобразование сигнала  $\gamma[k]$  до уровня разложения  $j$  [5, 6], в результате чего получаем множество коэффициентов вейвлет-пакета  $\Psi = \{w_j^p[k]\}$ . Исключая из рассмотрения вейвлет-коэффициенты, энергия которых выходит за заданную полосу пропускания  $\lambda$ , формируется множество  $\Psi_\phi$  коэффициентов вейвлет-пакета вида

$$\forall j, p : \Psi_\phi = \begin{cases} w_j^p, (p+1)2^{-j} \leq \lambda \\ 0, (p+1)2^{-j} > \lambda \end{cases}.$$

Далее сигнал  $\tilde{\gamma}_\delta[k]$ , сжатый на величину  $\delta$ , формируется по множеству  $\Psi_\phi$  путем вычисления обратного пакетного вейвлет-преобразования.

Детализирующие коэффициенты  $\tilde{d}_\delta[k]$  многомасштабного представления также вычисляются на основе обратного пакетного вейвлет-преобразования коэффициентов разложения  $\Psi_D$ , вычисляемых как  $\forall j, p : \Psi_D = \begin{cases} w_j^p, (p+1)2^{-j} > \lambda \\ 0, (p+1)2^{-j} \leq \lambda \end{cases}$ . Тогда

$$C(\gamma[k], \delta) = \{\tilde{\gamma}_\delta[k], \tilde{d}_\delta[k]\}. \quad (3)$$

Введем оператор  $E(\Gamma, \delta)$ , осуществляющий сглаживание (фильтрацию) кривой  $\Gamma$ . Тогда, учитывая (2) и (3), оператор  $E(\Gamma, \delta)$  реализуется следующей последовательностью шагов.

1.  $\Gamma = (\gamma^n[k], \gamma^m[k], \gamma^z[k]).$
2.  $\{\tilde{\gamma}_\delta^n[k], \tilde{d}_\delta^n[k]\} = C(\gamma^n[k], \delta), \{\tilde{\gamma}_\delta^m[k], \tilde{d}_\delta^m[k]\} = C(\gamma^m[k], \delta),$   
 $\{\tilde{\gamma}_\delta^z[k], \tilde{d}_\delta^z[k]\} = C(\gamma^z[k], \delta). \quad (4)$

3.  $\tilde{\Gamma} = (\tilde{\gamma}_\delta^n[k], \tilde{\gamma}_\delta^m[k], \tilde{\gamma}_\delta^z[k]). \quad (5)$

Используя операторную форму записи, окончательно получим

$$\tilde{\Gamma} = E(\Gamma, \delta). \quad (6)$$

Следует отметить, что степень (или коэффициент) сглаженности кривой, в данном случае, примем равной коэффициенту сжатия  $\delta$ .

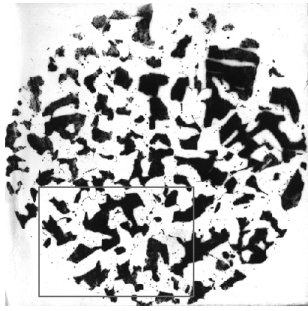
Очевидно, что возможно задание трех коэффициентов сжатия  $\delta^x$  в выражениях (4) для каждого из векторов  $\gamma^x[k]$ . Тогда выражения (5), (6) примут вид

$$\tilde{\Gamma} = (\tilde{\gamma}_{\delta^n}^n[k], \tilde{\gamma}_{\delta^m}^m[k], \tilde{\gamma}_{\delta^z}^z[k]), \quad \tilde{\Gamma} = E(\Gamma, \delta^n, \delta^m, \delta^z),$$

а степень сглаженности линейчатого объекта примем равной среднему арифметическому величин  $\delta^x$ .

Следует учитывать, что для практических задач сглаживания требуется наличие некоторого формального критерия оценки степени сглаженности, при которой сохраняются значимые детали кривых  $\Gamma$  и отсутствует большая часть шумов.

Для определения этого возможно применение критериев оценки детализирующих коэффициентов  $\tilde{a}_\delta[k]$  многомасштабного представления (3) векторов  $\gamma[k]$ .



а)

#### Характеристики образца:

Материал – сталь GS-C25 нормализованная.

Толщина стенки – 100 мм.

Масштаб снимка – 100:1.

#### Заключение эксперта (по ГОСТ 8233–56):

Относительная доля перлита – 45%.

Относительная доля феррита – 55%.

Балл ферритоперлитовой структуры стали – 7.



б)

#### Автоматизированная оценка балла зерна (до обработки контуров):

Относительная доля перлита – 52%.

Относительная доля феррита – 48%.

Балл ферритоперлитовой структуры стали – 6.



в)

#### Автоматизированная оценка балла зерна (после обработки контуров):

Относительная доля перлита – 47%.

Относительная доля феррита – 53%.

Балл ферритоперлитовой структуры стали – 7.

- а) – изображение микроструктуры; б) – контурный препарат изображения;  
в) – сглаженные контуры;

Рис. 1. Пример обработки изображения микроструктуры.

Поскольку  $\tilde{d}_\delta[k]$  – высокочастотная составляющая многомасштабного представления, то она помимо прочей информации, содержит и информацию о шумах сигнала  $\gamma[k]$ . Оценка шумовой составляющей может быть выполнена путем расчета информационных характеристик коэффициентов  $\tilde{d}_\delta[k]$ , таких как, единичная норма, энтропия Шеннона, логарифмическая энергия [7] и др.

Определяя, например, энтропию коэффициентов  $\tilde{d}_\delta[k]$ , по ее минимуму можно установить, при каком значении коэффициента сглаженности  $\delta$ , детализирующие коэффициенты  $\tilde{d}_\delta[k]$  соответствуют максимальному уровню шума, а сглаженный сигнал  $\tilde{\gamma}[k]$  содержит минимум элементов шумовой составляющей.

Т.к. кривая представляется тройкой векторов вида (2), то, следует учитывать, что уровень шума в каждом из сигналов  $\gamma[k]$  может быть различным, поэтому формирование сглаженного линейчатого объекта  $\tilde{\Gamma}$  должно выполняться по векторам  $\tilde{\gamma}[k]$  с разной степенью сглаженности.

Предложенный алгоритм использовался при решении практической задачи оценки балла зерна микроструктуры металла. Результаты применения алгоритма показаны на рис. 1. Исследования показали, что при использовании данного алгоритма удается повысить точность оценки содержания различных включений в структуре основного материала (в среднем на 10%), а также размеров включений (в среднем на 7%).

## Литература

1. ГОСТ 8233-56. Сталь. Эталоны микроструктуры. – Введ. 1956–11–26. – М.: Изд-во стандартов, 1956. – 12 с.
2. Хорн Ф. Атлас структур сварных соединений; пер. – М.: Металлургия, 1977. – 288 с.
3. Фомин А.А., Данилов С.Д. Многомасштабный анализ объектов изображений // Алгоритмы, методы и системы обработки данных: Сборник научных статей / Под ред. С.С. Садыкова, Д.Е. Андрианова – М.: ООО "Центр информационных технологий в природопользовании", 2007, С. 180-186.

4. *Фомин А.А.* Выделение и обработка контуров изображений на основе вейвлет-преобразования // Системы управления и информационные технологии, № 1.2 (27), 2007, С. 295-299.

5. *Малла С.* Вэйвлеты в обработке сигналов; пер. – М.: Мир, 2005. – 671 с.

6. *Добеши И.* Десять лекций по вейвлетам; пер. – Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2001. – 464 с.

7. *Bultheel A.* Wavelets, with applications in signal and image processing, 2002. – 181 p.