

УДК 004.932.2

## ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ПОСТРОЕНИЯ ВЫПУКЛОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ АНАЛИЗЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА

© 2014 Р.Г. Магдеев, Л.Ш. Биктимиров

Ульяновский государственный технический университет

Поступила в редакцию 02.12.2014

Проведен сравнительный анализ алгоритмов выделения выпуклой оболочки изображений бинарных объектов, применительно к металлографическим изображениям ферритно-перлитной микроструктуры металлов.

Ключевые слова: *обработка изображений, алгоритм, выпуклая оболочка, перлит-ферритовая структура*

Большинство исследований микроструктуры трубных малоуглеродистых и низколегированных сталей с ферритно-перлитной структурой проводится на поликристаллических образцах. При этом практически не рассматриваются вопросы связи соотношения форм и размеров фаз перлитных зёрен с долговечностью материала. Распределение фаз зерен и их форма отражают структуру металла, в частности, наличие смешанных форм фаз говорит о том, что в металле существуют дефекты структуры. Известно [1], что в любом материале идут два разных физических процесса – неупругая деформация и разрушение. На макроскопическом уровне разделить эти два процесса невозможно, на нем фиксируются лишь закономерности доминирующего процесса. В зависимости от условий таким процессом может стать и разрушение и неупругая деформация. Под деформацией здесь понимается накопление в материале необратимых сдвигов, но таких, при которых межатомные связи в теле зерна фаз существенно не нарушаются. Деформационное измельчение (фрагментация) фаз сопровождается образованием областей, разделенных малоугловыми и среднеугловыми границами.

В процессе длительной эксплуатации трубопроводов под воздействием динамических, вибрационных колебаний, а также внутритрубного давления наблюдается изменение соотношения фазовых составляющих, образование границ зерен перлита деформационного происхождения, следствием чего является появление упорядоченности и вытянутости зерен перлита в

**Алгоритмы выделения выпуклой оболочки.** Известны работы, в частности [1, 2], в которых предложены алгоритмы нахождения на металлографических изображениях некоторых микроструктурных параметров, например, таких как зернистость и общее отношение феррита к перлиту. Однако для получения большей информации о микроструктуре металла целесообразно исследование более «тонких» характеристик, таких, как параметры вытянутости пятен и вектор направленности зерен перлита. В простейшем случае среднюю вытянутость можно охарактеризовать параметром:

$$k_{\text{выт}} = \frac{1}{A_{\text{общ}}} \sum_{n=1}^N A_n k_n, \quad (1)$$

и среднюю направленность вектора перлитных пятен:

$$\vec{k}_{\text{напр}} = \frac{1}{A_{\text{общ}}} \sum_{n=1}^N (A_n \vec{a}_n), \quad (2)$$

где  $A_n$  – площадь,  $k_n$  – коэффициент вытянутости (один из примеров конкретизации этого понятия приведен ниже),  $\vec{a}_n$  – вектор направленности  $n$ -го пятна,  $n = 1, N$ ;  $A_{\text{общ}}$  – общая площадь учитываемых пятен.

Из выражений (1) и (2) видно, что для определения  $k_{\text{выт}}$  и  $\vec{k}_{\text{напр}}$  необходимо найти коэффициент вытянутости и вектор направленности для всех  $N$  пятен, имеющих на изображении. Исследования показали [3], что с точки зрения быстрой оценки и устойчивости оценок при решении задачи оценивания параметров вытянутости и угла

*Магдеев Радик Гильфанович, аспирант.*

*E-mail: radiktkd2@yandex.ru*

*Биктимиров Линар Шамилевич, аспирант.*

*E-mail: l.biktimirov@ulstu.ru*

направлении внутритрубного воздействия [2].

направленности изображения зерна перлита перспективным является подход, основанный на адаптивной псевдоградиентной адаптации [4]. Однако применение псевдоградиентного алгоритма оценивания указанных параметров эффективно только, если исследуемые перлитные пятна представлены их выпуклыми оболочками (ВО) (рис. 1, где  $(x_0, y_0)$  – центр тяжести пятна). Выпуклую оболочку пятна на плоском изображении можно определить как наименьший выпуклый многоугольник  $S$ , такой, что все точки пятна находятся либо на границе  $S$ , либо в его внутренней области [3]. Области, находящиеся между изображением пятна и его ВО, называют заливами.

Таким образом, параметры перлитных пятен можно найти в два этапа: построение выпуклой оболочки перлитных пятен и оценивание параметров  $k_n$  и  $\bar{a}_n$  с помощью псевдоградиентных алгоритмов. Известно много алгоритмов выделения ВО, например алгоритм Чана, Киркпатрика, Мелькмана [5], но наибольшую распространенность получили алгоритмы Грэхема [6], Джарвиса [7] и так называемый алгоритм «быстрой выпуклой оболочки» (БВО) [8]. Рассмотрим их эффективность для рассматриваемой задачи.

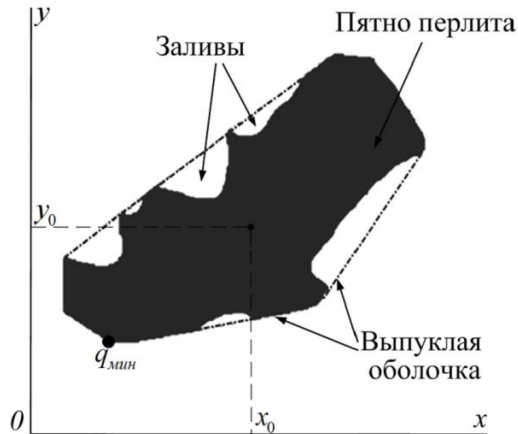


Рис. 1. Пример перлитного пятна и его выпуклой оболочки

Алгоритм Грэхема состоит из следующих основных этапов:

1) Нахождение минимальной точки объекта ( $q_{мин}$ ) (минимальная точка объекта определяется из условия минимального значения по оси ординат, а если таких точек несколько, то выбирается та, у которой значение по оси абсцисс наименьшее).

2) Сортировка точек границ объекта в порядке возрастания полярного угла, измеряемого против часовой стрелки относительно точки  $q_{мин}$

(если полярные углы нескольких точек совпадают, то из них выбирается одна, наиболее удалённая от  $q_{мин}$ ).

3) Обход Грэхема (в основе которого лежит понятие «левого» и «правого» углов [6]), в результате которого выделяются точки, являющиеся вершинами ВО.

4) Соединение найденных вершин.

Пример, демонстрирующий принцип работы алгоритма Грэхема, приведен на рис. 2, где  $q_i$  – потенциальная точка,  $q_{тек}$  – текущая точка, проходящая проверку на «правый» угол,  $q_{тек-1}$  – точка, состоящая в стеке перед проверяемой точкой,  $p_i$  – точки выпуклой оболочки исследуемого объекта. Как видно из рис. 2, вершины ( $q_4, q_6, q_7$ ), не прошедшие проверку на «правый» угол, не являются вершинами ВО. Вычислительная сложность алгоритма Грэхема не зависит от количества найденных вершин и пропорциональна  $q \log(q)$ , где  $q$  – количество внешних точек пятна.

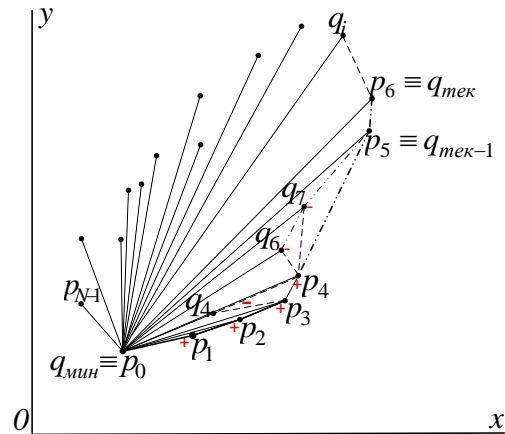


Рис. 2. Пример алгоритма Грэхема

Алгоритм Джарвиса [6] (также известный как алгоритм «упаковки подарка») по сравнению с алгоритмом Грэхема является более простым и наглядным, и состоит из следующих основных этапов:

1) Нахождение минимальной точки объекта  $q_{мин}$  (аналогично алгоритму Грэхема).

2) Обход Джарвиса [7], который выделяет точки выпуклой оболочки.

3) Соединение найденных точек.

Пример, иллюстрирующий принцип обхода Джарвиса, показан на рис.3, где  $q_i$  – граничные точки исследуемого пятна;  $p_{тек}$  – текущая точка обхода Джарвиса,  $p_{сл}$  – новая точка обхода Джарвиса, найденная на основе предыдущий по минимуму угла между векторами  $\vec{l}$  и направлением  $p_{тек} - p_{сл}$ . Вычислительная сложность алгоритма Джарвиса, в отличие от алгоритма Грэхема, зависит от количества вершин многоугольника (пятна) и пропорциональна  $qh$ , где  $h$  –

количество общих точек пятна и его выпуклой оболочки, что в худшем случае составляет  $q^2$ .

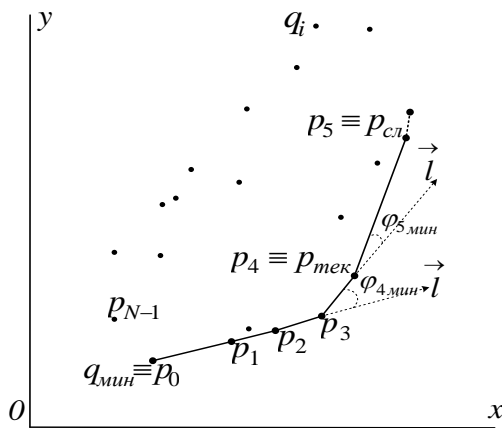


Рис. 3. Пример работы алгоритма Джарвиса

Алгоритм БВО состоит из следующих основных этапов:

1) Выбор двух крайних точек пятна – левой  $L$  и правой  $R$ , являющихся вершинами ВО. Выбор точек пятна, имеющих наибольшее и наименьшее значение по оси абсцисс (если существуют несколько точек с одинаковыми значениями, то выбирается любая из них с наибольшим (наименьшим) значением).

2) Построение прямой, проходящей через точки  $L$  и  $R$ , и разбиение множества всех точек на два подмножества: расположенных выше и ниже прямой  $LR$  соответственно.

3) Рассмотрение подмножества точек, расположенных выше прямой  $LR$ . Выбор точки  $p_1$ , являющейся наиболее удаленной от прямой  $LR$  (если для нескольких точек расстояние до прямой  $LR$  одинаково, то выбирается та, у которой угол  $p_1LR$  наибольший). Точка  $p_1$  признается вершиной ВО.

4) Построение прямых  $Lp_1$  и  $p_1R$ . Исключение из дальнейшего рассмотрения точек, расположенных справа от прямых, как внутренних точек треугольника  $p_1R$ , не могущих принадлежать ВО.

5) Рассмотрение подмножества точек, расположенных слева от прямой  $Lp_1$ , для которого находится точка  $p_{11}$ , наиболее удаленная от прямой  $Lp_1$  (аналогично п.3). Точка  $p_{11}$  признается вершиной ВО.

6) Для всех последующих образующихся подмножеств проводятся операции, аналогичные п.4 и п.5, пока слева не останется ни одного подмножества, созданного ранее.

7) Аналогично пп.3-6 рассматривается подмножество точек, расположенное ниже прямой  $LR$ .

Пример, демонстрирующий работу алгоритма Джарвиса, приведен на рис. 4. Вычисли-

тельная сложность алгоритма складывается из сложности построения все подмножеств.

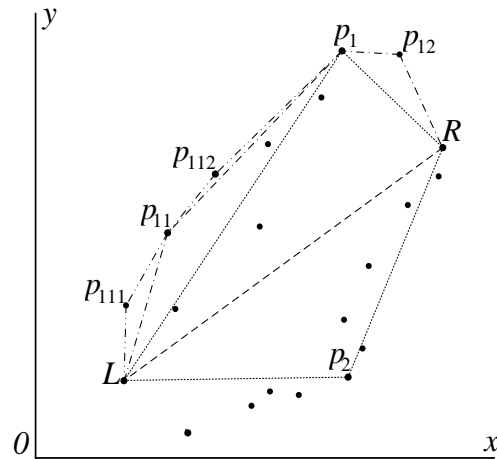
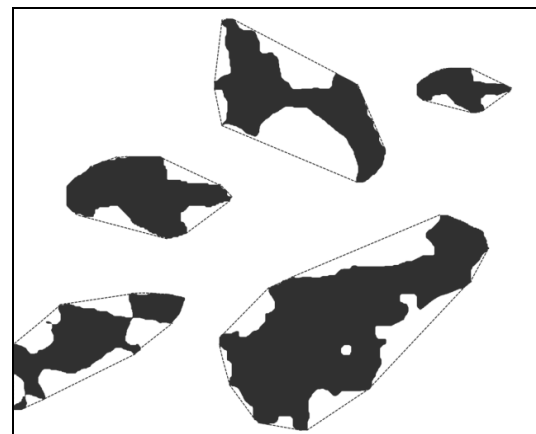


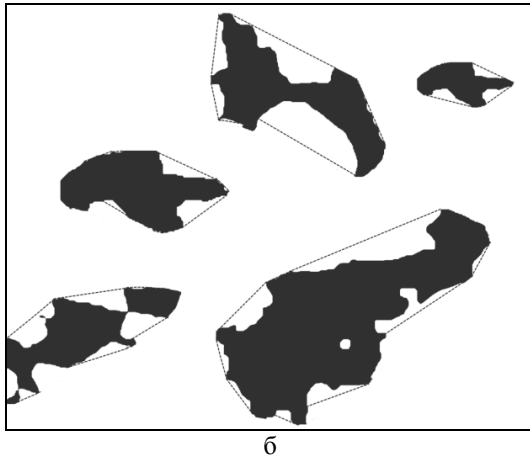
Рис. 4. Пример работы алгоритма БВО

В лучшем случае задача разбивается на две равномошные подзадачи, тогда сложность алгоритма определяется рекурсивным уравнением и составляет от  $2q$  до  $q^2$ . Достоинством алгоритма Джарвиса является возможность параллельных вычислений для всех подмножеств точек.

**Экспериментальные результаты.** Рассмотренные алгоритмы нахождения ВО были исследованы на бинарных изображениях простых фигур (типа звезды) и перлитных пятен. На простых фигурах все алгоритмы показали правильный результат с небольшим различием в быстродействии. На бинарных изображениях реальных объектов – перлитных пятен, полученных из изображений микроструктур металлических трубопроводов, алгоритм Джарвиса и алгоритм БВО выделяют ВО пятна перлита правильно (рис. 5а), в отличие от алгоритма Грэхема (рис. 5б), дающего ошибки выделения ВО. При этом среднее время работы алгоритма Грэхема ( $\approx 12$  мс) примерно в 1,1 раза меньше, чем у алгоритма БВО и в 1,9 раза меньше, чем у алгоритма Джарвиса (вычисления производились на ПК AMD Athlon II X2 3ГГц с ОЗУ 3Гбайт).



а



**Рис. 5.** Пример выделения выпуклых оболочек перлитных пятен: а – алгоритмы БВО и Джарвиса, б – алгоритм Грэхема

После нахождения ВО перлитных пятен, необходимо найти их параметры. Исследования показали, что ВО перлитного пятна сильно коррелирована с простой геометрической фигурой – эллипсом, особенно после обработки сглаживающим фильтром, имеющем размер около 10% размера ВО. При этом параметром вытянутости может служить отношение большой и малой полуосей эллипса, а угол вектора направленности соответствует углу направления большей полуоси.

Выбрав изображение эллипса в качестве настраиваемого шаблона  $S(\bar{\alpha})$  ВО S перлитного пятна нужно задать модель подстройки (совмещения) эталона. Например, это может быть модель деформации системы координат, в которой задан эллипс, в частности, содержащая параметры  $\bar{\alpha}$ : угол поворота  $\varphi$ , коэффициенты масштаба  $k_x$  и  $k_y$ , параллельный сдвиг  $\bar{h} = (h_x, h_y)$ . Тогда координаты точки  $(x, y)$  на изображении шаблона  $S(\bar{\alpha})$  в соответствии с заданным вектором параметров  $\bar{\alpha} = (h_x, h_y, \varphi, k_x, k_y)^T$  будут соответствовать координатам точки на изображении ВО:

$$\begin{aligned} \tilde{x} &= x_0 + k_x((x - x_0)\cos \varphi - k(y - y_0)\sin \varphi) + h_x, \\ \tilde{y} &= y_0 + k_x((x - x_0)\sin \varphi + k(y - y_0)\cos \varphi) + h_y, \end{aligned}$$

где коэффициент  $k=k_y/k_x$  является оценкой вытянутости, а  $\varphi$  – оценкой направленности перлитного пятна;  $(x_0, y_0)$  – координаты центра поворота, в качестве которого можно выбрать центр тяжести пятна. Указанные параметры могут быть найдены с помощью адаптивных псевдоградиентных процедур [4]. Поскольку рабочий диапазон этих процедур ограничен [9], целесообразно задать несколько начальных приближений

параметров  $k$  и  $\varphi$  (а также  $k_x$  и  $\bar{h}$ ). Исследования показали, что для параметров  $k$  и  $\varphi$  в рассматриваемой задаче, как правило, достаточно пяти начальных приближений шаблона (табл. 1).

**Таблица 1.** Пример набора эталонов

Начальное приближение		Изображение шаблона
$k_0$	$\varphi_0$	
1	$0^0$	
$\frac{1}{2}$	$\pm \frac{\pi}{6}$	
2	$\pm \frac{\pi}{6}$	

Сравнение предложенного подхода с другими возможными способами оценки параметров перлитных пятен из работы [10], показало высокую надёжность предлагаемого подхода.

**Выводы:** в работе исследованы наиболее популярные алгоритмы выделения выпуклой оболочки: Грэхема, Джарвиса и БВО. Показано, что с небольшим различием в быстродействии все алгоритмы уверенно работают на простых изображениях. На реальных бинарных изображениях зерен перлита, полученных из полутонковых изображений поверхностей металлических структур, алгоритм Грэхема делает ошибки при выделении ВО. Алгоритмы Джарвиса и БВО дают правильный результат, но алгоритм Джарвиса существенно медленнее. Таким образом, для рассмотренной задачи с точки зрения быстродействия и точности наиболее приемлемым является алгоритм БВО.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 13-01-00555 \_а.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Гумеров, А.Г. Старение труб нефтепроводов / А.Г. Гумеров, Р.С. Зайнуллин, К.М. Ямалеев, А.В. Росляков. – М.: Недра, 1995. 222 с.
2. Виноградова, Л.А. Алгоритм определения соотношения форм фаз в перлите трубных сталей со структурой феррит и перлит/ Л.А. Виноградова, Р.Г. Магдеев, Ю.В. Курганова // Ремонт, восстановление, модернизация. 2012. №6. С. 41-45.

3. *Магдеев, Р.Г.* Эффективность идентификации объектов на бинарных изображениях с использованием процедур псевдоградиентной адаптации / *Р.Г. Магдеев, А.Г. Ташлинский* // Радиотехника. 2014. № 7. С. 96-102.
4. *Tashlinskii, A.G.* Computational expenditure reduction in pseudo-gradient image parameter estimation // *Lecture Notes in Computer Science*. 2003. Vol. 2658. P. 456-462.
5. *Садыков, С.С.* Алгоритмы определения длины и ширины дискретных площадных объектов / *С.С. Садыков, Д.Н. Стародубов* // Автоматизация и современные технологии. 2007. № 10. С. 8-12.
6. *Graham, R.L.* An efficient algorithm for determining the convex hull of a finite planar set // *Information Processing Letters*. 1972. Vol. 1. P. 132-133.
7. *Jarvis, A.* On the identification of the convex hull of a finite set of points in the plane // *Information Processing Letters*. 1973. Vol. 2. P. 18-21.
8. *Barber, C.B.* The quickhull algorithm for convex hulls / *C.B. Barber, D.P. Dobkin, H. Huhdanpaa* // *ACM Transactions on Mathematical Software*. 1996. Vol. 22(4). P. 469-483.
9. *Magdeev, R.G., Tashlinskii A.G.* A comparative analysis of the efficiency of the stochastic gradient approach to the identification of objects in binary images // *Pattern recognition and image analysis*. 2014. Vol. 24. № 4. P. 535-541.
10. *Кормен, Т.* Алгоритмы. Построение и анализ / *Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн*. 2-е изд. – М.: Вильямс, 2005. С. 1063-1073.

## APPLICATION OF THE CONVEX HULL CONSTRUCTION ALGORITHMS FOR METAL MICROSTRUCTURE IMAGE ANALYSIS

© 2014 R.G. Magdeev, L. Sh. Biktimirov

Ulyanovsk State Technical University

The paper provides a comparative analysis of methods for the isolation of the convex hull of the binary objects' images with respect to metallographic images of ferrite-pearlite microstructure of metals.

Key words: *image processing, algorithm, convex hull, ferrite-pearlite structure*

---

*Radik Magdeev, Post-graduate Student.*

*E-mail: radiktd2@yandex.ru*

*Linar Baktimirov, Post-graduate Student.*

*E-mail: l.biktimirov@ulstu.ru*