

А. В. МОРОЗ, А. А. ВОДКА

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ ФОТОГРАФИЙ МИКРОШЛИФОВ

При розробці нових матеріалів, а також в процесі виготовлення деталей з металевих матеріалів, важливим етапом є вимір розміру зерна. Для проведення досліджень параметрів мікроструктури на механічні властивості матеріалів важливо мати можливість генерувати мікроструктуру з заданим розміром зерна. Для цього в роботі була створена комп'ютерна програма, яка аналізує методом січних розмір зерна матеріалу, а також на основі отриманих даних дозволяє моделювати нові мікроструктури за раніше отриманими статистичними параметрами зернистості. У програмі реалізовані методи обробки фотознімку, використаний алгоритм Вороного для генерації зернистості металу. Характеристики отриманої зернистої структури металу порівнювалася з результатами аналізу оригінальних фотознімків структури металу. Додаток розроблено з використанням програмної платформи .NET і мови програмування C#.

Ключові слова: мікроструктура, діаграма Вороного, розмір зерна, .NET, C#.

При разработке новых материалов, а также в процессе изготовления деталей из металлических материалов важным этапом является измерение размера зерна. Для проведения исследований параметров микроструктуры на механические свойства материалов важно иметь возможность генерировать микроструктуру с заданным размером зерна. Для этого в работе была создана компьютерная программа, которая анализирует методом секущих размер зерна материала, а также на основе полученных данных позволяет моделировать новую микроструктуру по ранее полученным статистическим параметрам зернистости. В программе реализованы методы обработки фотоснимка, использован алгоритм Вороного для генерации зернистости металла. Характеристики полученной зернистой структуры металла сравнивались с результатами анализа оригинальных фотоснимков структуры металла. Приложение разработано с использованием программной платформы .NET и языка программирования C#.

Ключевые слова: микроструктура, диаграмма Вороного, размер зерна, .NET, C#.

The development of new materials and during manufacturing process of parts from metallic materials it is an important step to measure the material grain size. In order to study the microstructure of parameters on the mechanical properties of materials it is important to be able to generate a microstructure with predetermined grain size. This approach allows using computer aided modeling of the mechanical behavior at the micro scale. Analyzing of grain size manually is quite time-consuming task. To automate this process, a computer program has been created, which uses method of intersecting lines and determine the grain size of the material. Based on these results, it allows to build a new microstructure on the previously obtained statistical parameters of grain, which is equivalent to photographs of the microstructure. The program implemented methods of image processing; the algorithm of Voronoi diagram is used. Characteristics of the obtained granular metal structure compared with the results of analysis of the original photographs of metal structure. The application developed using .NET software platform and the C # programming language.

Keywords: microstructure, Voronoi diagram, grain size, .NET, C #.

Введение. Микроструктура металлического материала является одной из основных его характеристик, а ее качество в значительной мере определяет его механические свойства. Одним из показателей качества микроструктуры является размер и форма зерен. Для их оценки применяются методы количественной металлографии, что позволяет определить параметры структуры сплавов: величины включений, размер и форму зерен отдельных фаз, присутствующих в сплаве, и, особенно, размеры зерна основной фазы.

Величина зерна в значительной степени влияет на свойства металла, это приводит к необходимости контролировать размер зерен. На практике он определяется с помощью микроскопа различными методами, один из которых заключается в подсчете границ зерен, пересекаемых отрезками прямых линий с последующим определением среднего условного диаметра [1].

Контроль зернистости металла осуществляется различными способами (ультразвуковым, пластическими деформациями и т.д.), однако для их применения необходимо ясно представлять какую структуру необходимо создать. В связи с этим, широко распространены компьютерные системы моделирования структуры металла, вариант такой системы представлен в данной работе.

Анализ последних исследований и литературы. Зерна металлов – это отдельные кристаллы поликристаллического конгломерата, разделенные между собой смежными поверхностями, называемыми границами зерен. Металлы, которые используются в практике производства, состоят из зерен различных размеров. При анализе микроструктуры выделяют два типа: однородная и разнородная. Однородная структура соответствует одному фотоэталоноу шкалы [1, 2]. Такую структуру оценивают одним номером. Разнородной структурой считается структура, в которой имеются зерна, отличающиеся от основного номера, фотоэталоноу шкалы [1-2] более чем на один номер.

Разработке программного обеспечения для оценки параметров микроструктуры посвящено большое количество работ. В работе [3] рассматривается экспериментальные исследования 3х-мерной микроструктуры аустенитной стали. В работах [4-7] рассматриваются вопросы разработки прикладных программ для анализа изображений микроструктуры. Алгоритмы обработки изображений рассмотрены в работах [8-10].

К методам обработки фотоснимка структуры металла относится метод секущих [1-2], который заключается в подсчете пересечений зерен линиями, проведенными на матовом стекле микроскопа или на фотографиях, на которых проводят несколько отрезков произвольной длины, при этом отрезок должен пересекать не менее 10 зерен. Увеличение подбирают та-

ким образом, чтобы на исследуемой поверхности в видимом поле было видно не менее 50 зерен. Зерна на концах прямой, не пересекаемые ею целиком, принимают за одно. Определяют суммарную длину отрезков L , выраженную в мм натуральной величины на шлифе, и суммарное число пересеченных зерен N . Графическая иллюстрация метода приведена на рис. 1. Средний условный диаметр зерна в мм вычисляют по формуле:

$$dL = L/N. \quad (1)$$

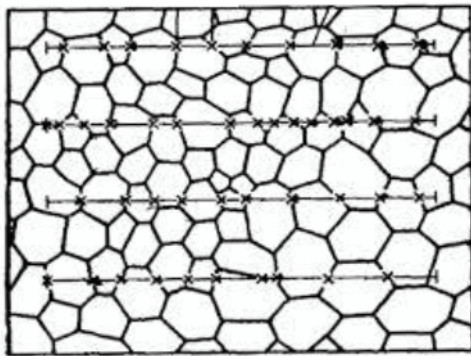


Рисунок 1 – Иллюстрация метода секущих для определения размера зерна

Для моделирования новой макроструктуры металла необходимо разработать или применить существующий метод создания изображений с многоугольными объектами, одним из существующих методов является построение диаграммы Вороного, посредством которой и будут сгенерирована зернистая структура металла. Принципы построения диаграммы Вороного описаны в [11], а эффективная реализация алгоритмом Форчуна в [12].

Постановка задачи. Целью данной статьи является разработка приложения для определения размера зерна микроструктуры металла, а также генерация эквивалентной микроструктуры. Предполагается, по заранее выбранному, оригинальному изображению микроструктуры металла, генерировать новую зернистую структуру в виде двумерного растрового изображения. Анализ и моделирование структуры должны быть применимы к однородной зернистой структуре металла, у которой геометрия зерен приблизительно одинакова. Выполнение поставленной цели проводилось поэтапно:

- анализ фотоснимка зернистой структуры металла в ранее разработанной программе;
- генерация новой зернистой структуры в виде двумерного изображения с использованием диаграммы Вороного;
- приведение в соответствие генерируемого изображения с действительным изображением зерен металла;

В результате работы приложения предполагается получить номер зерна G по ГОСТ5639-82 [1], и сгенерированную структуру, чтобы иметь возможность сравнить ее с исходной и оценить точность работы реализованного метода.

Разработка программы. Исходными данными для задачи является цифровой фотоснимок микроструктуры металла, выполненный с увеличением 100 раз.

Для реализации поставленной цели, было написано настольное приложение с использованием программной платформы .NET Framework в среде разработки Visual Studio.

Приложение, в исходных данных, принимает изображения с протравленного шлифа металла четкими границами зерен, и, при необходимости, обработанные графическими фильтрами, для получения более точных результатов. Также возможно регулировать размер включений, для учета в анализе, и его цветовую чувствительность.

В программе реализован метод секущих линий для определения среднего условного размера зерна, таким образом, на анализируемом изображении будет построена сетка из линий, вдоль которых будет подсчитываться количество пересечений с границами зерен металла (рис. 2). Зная суммарную длину всех линий и количество пересечений, можно подсчитать средний условный размер зерна.

При построении сетки, подсчитывается количество пересечений и визуализируются границы зерен, упрощенный алгоритм представлен на рис.3.

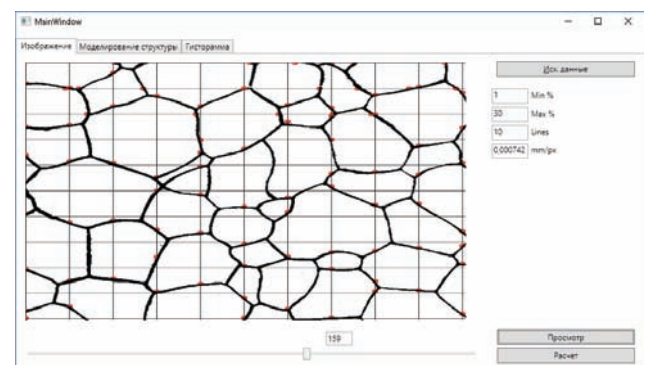


Рисунок 2 – Главное окно приложения

Вход($i = 0$, Размер зерна = 0)

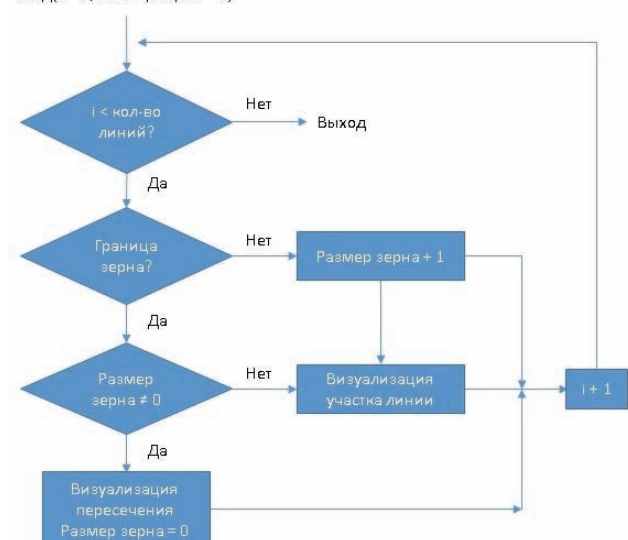


Рисунок 3 – Алгоритм определения размера зерна

Таким образом, изображения зернистой структуры с нанесенными секущими линиями и отображением границ зерен будет выглядеть следующим образом рис. 1.

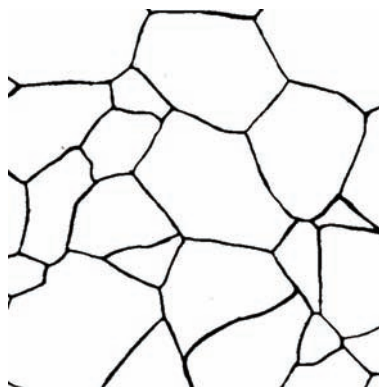
Данные анализа исходного изображения необходимы для генерации новой структуры с помощью алгоритма Вороного. В приложении, алгоритм Вороного используется как сторонняя динамическая библиотека, рассмотрим интерфейс взаимодействия с библиотекой на примере кода C#:

```
public class Voronoi
{
    public Voronoi(double minDistanceBetweenSites);
    public List<GraphEdge> generateVoronoi(double[] xVals-
```

```
uesIn, double[] yValuesIn, double minX, double maxX, double
minY, double maxY);
}
```

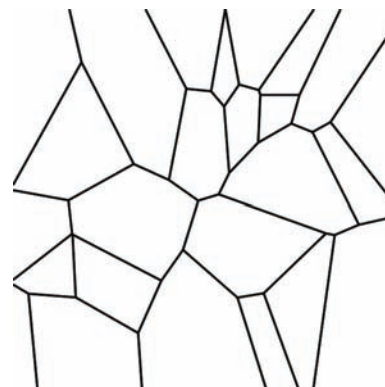
здесь ключевыми для являются конструктор класса *Voronoi*, который принимает число – минимальное в расстоянии в пикселях изображения между ячейками Вороного и метод *generateVoronoi* – первые два параметра которого координаты центров ячеек Вороного. Данные для метода будут получены при анализе исходного изображения зерен металла, т. к. обрабатывается однородная структура зернистости металла, геометрия зерен приблизительно одинакова, что дает возможность с легкостью вычислить координаты центров для ячеек Вороного.

Исходная микроструктура



а) средний условный размер зерна 90 мкм

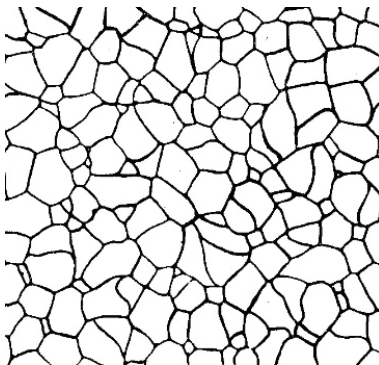
Сгенерированная микроструктура



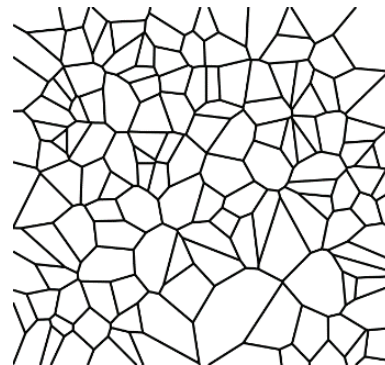
б) средний условный размер зерна 84 мкм

Номер зерна $G = 3$

Номер зерна $G = 6$

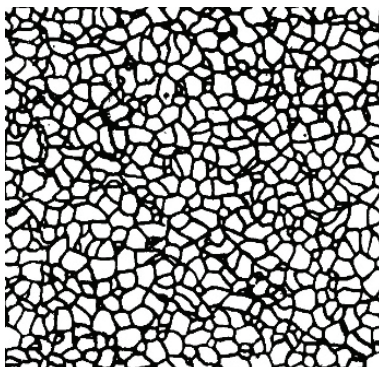


в) средний условный размер зерна 30,4 мкм

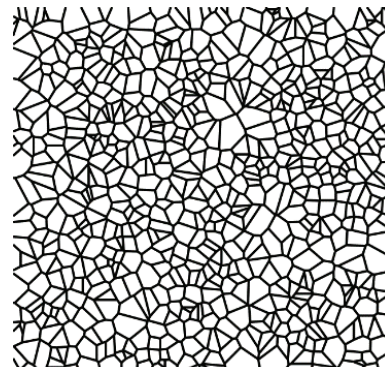


г) средний условный размер зерна 34,1 мкм

Номер зерна $G = 8$



д) средний условный размер зерна 16,3 мкм



е) средний условный размер зерна 17,0 мкм

Рис. 4 – Результаты работы приложения: исходная и сгенерированная эквивалентная микроструктура

Результати. Рассмотрим результаты работы приложения. Вид главного окна представлен на рис. 2. На форме приложения пользователь может выбрать изображения для анализа, минимальный и максимальный размеры зерен для учета в анализе, количество линий на сетке и масштаб для приведения условного среднего размера зерна в миллиметры.

Для тестирования было выбрано 10 изображений шлифа металла, каждое из которых отвечает номеру зерна G по ГОСТ5639-82 [1], для каждого исходного изображения, по результатам анализа, были сгенерированы ячейки Вороного. Результаты анализа размера зерна и сгенерированная эквивалентная микроструктура предоставлены на рис. 4.

Как видно из рисунка, наблюдается достаточно хорошее качественное и количественное согласование размеров зерен, построенных программой, и полученных из анализа микроструктуры.

Выводы. В работе рассмотрены вопросы построения микроструктур поликристаллических материалов на основе диаграммы Вороного. Для этого разработано приложение, которое позволяет автоматически определять размер зерна по ГОСТ 5639-82, и на основе полученных результатов строить диаграммы Вороного, которые эквивалентны по размерам зерна. Сравнения размеров зерен исходных и сгенерированных микроструктур показало хорошее количественное и качественное соответствие.

Список литературы:

1. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна: ГОСТ 5639-82. – [Действителен от 1983.01.01]. – М.: Издательство стандартов. – 1994 – I, 45 с.
2. ASTM International // ASTM E112 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size / ASTM Int'l // Center For Library Initiatives. – 2013. – P. 27.
3. Lewis A. C. Two- and three-dimensional microstructural characterization of a super-austenitic stainless steel / A. C. Lewis, J. F. Bingert, D. J. Rowenhorst[et al.] // *Materials Science and Engineering: A*. — 2006. — Vol. 418, No. 1–2. — P. 11–18.
4. Lewis A. C. Image-based modeling of the response of experimental 3d microstructures to mechanical loading / A. C. Lewis, A. B. Geltmacher // *Scripta Materialia*. — 2006. — Vol. 55, No. 1. — P. 81–85.
5. MADEJ L. Digital material representation as an efficient tool for strain inhomogeneities analysis at the micro scale level / L. MADEJ, L. RAUCH, K. PERZYNSKI, P. CYBULKA // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. — 2011. — Vol. 11, No. 3. — P. 661–679.
6. Rauch L. Application of the automatic image processing in modeling of the deformation mechanisms based on the digital representation of microstructure / L. Rauch, L. Madej // *International Journal for Multiscale Computational Engineering*. — 2010. — Vol. 8, No. 3. — P. 343–356.
7. Shan Z. Digital image analysis and microstructure modeling tools for microstructure sensitive design of materials / Z. Shan, A. M. Gokhale // *International Journal of Plasticity*. — 2004. — Vol. 20, No. 7. — P. 1347–1370.
8. Литовченко С. В. Автоматизация анализа металлографических структур / С. В. Литовченко, Т. В. Мальхина, Л. О. Шпагина, В. О. Шпагина

- // *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія : Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління*. — 2011. — No. 16. — P. 215–223.
9. Мартюшев Н. В. Программные средства для автоматического металлографического анализа / Н. В. Мартюшев // *Современные проблемы науки и образования*. — 2012. — No. 5.
 10. Чичко А. Н. Программное обеспечение и алгоритмы для анализа изображений микроструктур перлитных сталей / А. Н. Чичко, О. А. Сачек, С. Г. Лихоузов // *Программные продукты и системы*. — 2010. — No. 4. — P. 123–127.
 11. Aurenhammer F. Voronoi diagrams---a survey of a fundamental geometric data structure / F. Aurenhammer, Franz // *ACM Computing Surveys*. — 1991. — Vol. 23, No. 3. — P. 345–405.
 12. Fortune S. A sweepline algorithm for voronoi diagrams / S. Fortune // *Algorithmica*. — 1987. — Vol. 2, No. 1–4. — P. 153–174.

Bibliography (transliterated):

1. Stali i splavy. Metody vyjavlenija i opredelenija velichiny zerna: GOST 5639-82, Izdatel'stvo standartov, 1994, pp. 45
2. ASTM E112-13 (2014) 'Standard Test Methods for Determining Average Grain Size', ASTM International, pp. 1–28. doi: 10.1520/E0112-13.1.4.
3. Lewis, A. C., Bingert, J. F., Rowenhorst, D. J., Gupta, A., Geltmacher, A. B. and Spanos, G. (2006) 'Two- and three-dimensional microstructural characterization of a super-austenitic stainless steel', *Materials Science and Engineering: A*, 418(1–2), pp. 11–18. doi: 10.1016/j.msea.2005.09.088.
4. Lewis, A. C. and Geltmacher, A. B. (2006) 'Image-based modeling of the response of experimental 3D microstructures to mechanical loading', *Scripta Materialia*, 55(1), pp. 81–85. doi: 10.1016/j.scriptamat.2006.01.043.
5. MADEJ, L., RAUCH, L., PERZYNSKI, K. and CYBULKA, P. (2011) 'Digital Material Representation as an efficient tool for strain inhomogeneities analysis at the micro scale level', *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 11(3), pp. 661–679. doi: 10.1016/S1644-9665(12)60108-3.
6. Rauch, L. and Madej, L. (2010) 'Application of the Automatic Image Processing in Modeling of the Deformation Mechanisms Based on the Digital Representation of Microstructure', *International Journal for Multiscale Computational Engineering*, 8(3), pp. 343–356. doi: 10.1615/IntJMultCompEng.v8.i3.90.
7. Shan, Z. and Gokhale, A. M. (2004) 'Digital image analysis and microstructure modeling tools for microstructure sensitive design of materials', *International Journal of Plasticity*, 20(7), pp. 1347–1370. doi: 10.1016/j.ijplas.2003.11.003.
8. Martjushev, N. V. (2012) 'Programmnye sredstva dlja avtomaticheskogo metallograficheskogo analiza', *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. Obshhestvo s ogranichennoj otvetstvennost'ju 'Izdatel'skij Dom 'Akademija Estestvozna-nija'*, (5).
9. Chichko, A. N., Sachek, O. A. and Lihousov, S. G. (2010) 'Programmnoe obespechenie i algoritmy dlja analiza izobrazhenij mikrostruktur perlityh stalej', *Programmnye produkty i sistemy*, (4), pp. 123–127.
10. Litovchenko, S. V., Malyhina, T. V., Shpagina, L. O. and Shpagina, V. O. (2011) 'Avtomatizacija analiza metallograficheskikh struktur', *Visnik Harkivs'kogo nacional'nogo universitetu imeni V. N. Karazina. Serija □: Matematichne modeljuvannja. Informacijni tehnologii. Avtomatizovani sistemi upravlinnja*, (16), pp. 215–223.
11. Aurenhammer, F. and Franz (1991) 'Voronoi diagrams---a survey of a fundamental geometric data structure', *ACM Computing Surveys*. ACM, 23(3), pp. 345–405. doi: 10.1145/116873.116880.
12. Fortune, S. (1987) 'A sweepline algorithm for Voronoi diagrams', *Algorithmica*. Springer-Verlag, 2(1–4), pp. 153–174. doi: 10.1007/BF01840357.

Поступила (received) 20.09.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Водка Олексій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри динаміки та міцності машин; м. Харків, Україна; e-mail: oleksii.vodka@gmail.com.

Oleksii Vodka – Ph. D., National Technical University "KhPI", Docent of Dynamics and Strength of Machines Department, Kharkov, Ukraine; e-mail: oleksii.vodka@gmail.com.

Мороз Аلكсей Владимирович – студент Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри динаміки та міцності машин; м. Харків, Україна; e-mail: oleksiy.v.moroz@gmail.com

Oleksii Moroz – student of National Technical University "KhPI", student Dynamics and Strength of Machines Department, Kharkov, Ukraine e-mail: oleksiy.v.moroz@gmail.com.