

УДК 543.456+52-17

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ ПО ИХ ИЗОБРАЖЕНИЯМ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ТРЕХМЕРНОГО СТЕРЕОАНАЛИЗА

А.П. Калинин, В.В. Манойлов, О.А. Приходько

Рассмотрена возможность применения среды программирования MATLAB для статистического стереоанализа дисперсных систем по их двумерным изображениям. Описаны функции и результаты использования программного модуля, подготовленного для построения вероятностной, статистически обусловленной 3D-модели, которая соответствует более точному описанию структуры и прогнозированию свойств дисперсных систем.

Ключевые слова: среда программирования, статистический анализ, дисперсные системы, микроструктура.

Введение

Для микроструктурного анализа материалов в настоящее время существуют программные пакеты, в частности, ImageExpert Pro 3, Spectr-Met, Microkon Met [1–3] и др. Недостатком данных пакетов является отсутствие функций по построению вероятностных 3D-моделей внутренней структуры материалов на основе статистической обработки двумерных изображений плоских сечений с применением соотношений, известных из стереометрической металлографии [4] и предназначенных для стереоанализа структур. Например, в третьей версии ImageExpert Pro 3 реализована трехмерная визуализация с использованием технологии OpenGL, позволяющая получить реалистичное объемное изображение поверхностного рельефа, синтезированного на основе послойной оптической микроскопии. Однако отсутствует построение вероятностных трехмерных структур по следам их элементов на двумерных сечениях и проекциях, которое дает наиболее объективное представление о внутренней структуре материалов.

Цель настоящей работы заключалась в создании программного модуля в универсальной программной среде MATLAB для реализации возможностей стереоанализа, который позволял бы определять трехмерные геометрические параметры структуры материалов по их статистически обусловленным вероятностным 3D-моделям, построенным на основе анализа элементов двумерных изображений структур.

В качестве контрольных объектов, использованных для разработки и настройки программного модуля, были взяты типичные двумерные изображения структур дисперсных систем (ДС) с разными типами входящих в них фаз: обе фазы твердые (Т/Т) – сплав железа и углерода; одна фаза твердая, другая газообразная (Т/Г) – порошок абразива и пенополистирол; одна фаза твердая, другая жидкая (Т/Ж) – золь.

Знание статистических параметров трехмерной структуры таких сплавов, как ДС типа Т/Т, позволяет:

- получить наиболее достоверные зависимости между свойствами и структурой, а также между структурой, составом и режимами технологической обработки сплавов;
- более объективно выявить физическую природу процессов, протекающих в сплавах при их обработке и эксплуатации;
- более точно выбрать оптимальный состав, наилучшую технологию получения и обработки, обеспечивающие создание нужной структуры и, следовательно, требуемых свойств сплавов.

Знание статистических трехмерных параметров таких ДС, как порошки абразива (Т/Г) и золи (Т/Ж), даст возможность более объективно оценить степень их дисперсности, однородность дисперсной фазы с учетом формы частиц.

Создание в среде MATLAB программного модуля для построения трехмерных моделей по изображениям двумерных сечений и проекций разбито на два этапа:

1. разработка, отладка и тестирование модуля статистической обработки и анализа двумерных изображений;
2. дополнение разработанного модуля функциями для построения и анализа 3D-моделей ДС с использованием статистических параметров двумерных изображений.

Ограничения, присутствующие при анализе структуры ДС по двумерным изображениям

В случае анализа структуры ДС типа Т/Т методом оптической металлографии выявляют и изучают двумерные изображения микроструктур в сечениях образца плоскостью шлифа (рис. 1).

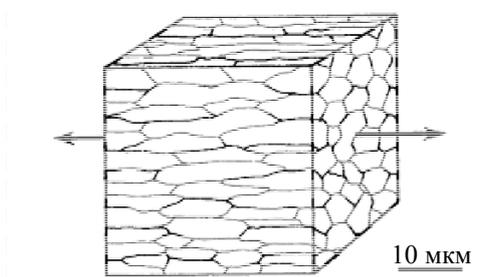


Рис. 1. Двумерные изображения структуры условного образца при различной ориентации плоскости шлифа. Стрелками показано направление текстуры поликристалла

Однако рассмотрение отдельных двумерных изображений создает лишь приблизительное представление о действительном строении трехмерной структуры [4], так как:

1. плоскость шлифа проходит через элементы структуры по случайному сечению, не отражающему объективно их размеры;
2. вероятность пересечения крупных зерен поликристалла и включений дисперсных фаз больше, чем мелких, поэтому доля крупных зерен и включений, определенная по двумерным изображениям, оказывается больше, чем в реальной трехмерной структуре;
3. форма зерен и других структурных элементов может быть несимметричной, что вызывает затруднения при анализе структуры по изображениям отдельных случайных сечений.

В случае дисперсных порошков и золь (рис. 2) наблюдается проекция частиц на плоскость изображения, однако полученная информация будет необъективной, так как частицы могут быть вытянуты вглубь слоя и иметь сложную форму. Неизбежно также заслонение частиц друг другом.

Несмотря на отмеченные ограничения, параметры двумерных изображений применяют для изучения структуры и свойств ДС, однако более объективную оценку структуры и свойств можно получить, используя сведения о трехмерной структуре этих систем. Без разрушения образцов такие сведения можно получить при изучении вероятностной, статистически обусловленной 3D-модели ДС, построенной на основе соотношений, используемых в стереометрической металлографии. Так как методы стереометрической металлографии являются статистическими, то анализируемые ДС должны представлять собой

статистически значимую совокупность элементов. В настоящей работе представлены начальные результаты разработки и выявления возможностей программного модуля, который на основе статистической оценки параметров двумерных изображений ДС позволяет изучать трехмерную структуру материалов.

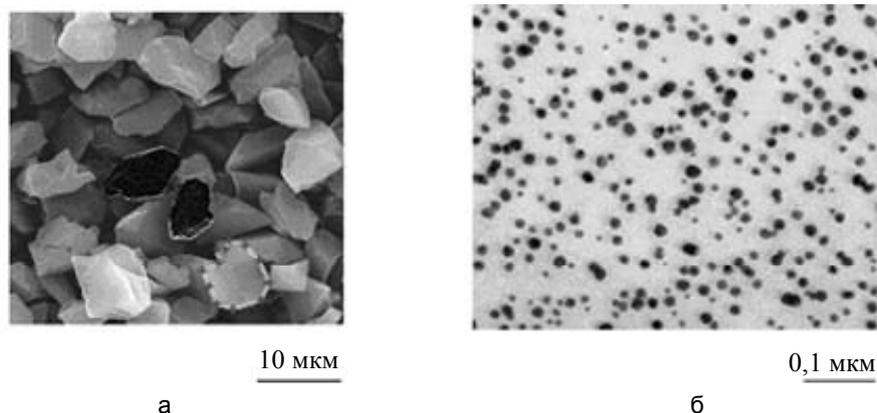


Рис. 2. Изображение двумерной проекции порошка (а) и слоя золя (б). На рис. 2, а, в полуавтоматическом режиме точками и контуром обведены нечеткие границы частицы

Программный модуль статистической обработки и анализа двумерных изображений ДС и построения 3D-моделей в среде MATLAB

Модуль реализует следующие основные функции:

- ввод и масштабирование исходных двумерных изображений различных сечений и проекций;
- пространственная и частотная фильтрация изображений для повышения четкости, контрастности и яркости отдельных элементов структуры;
- пороговая обработка изображений для преобразования в бинарный вид;
- морфологическая обработка изображений для выявления границ элементов структуры;
- определение координат, количества и геометрических параметров элементов структуры;
- построение эмпирических распределений геометрических параметров элементов структуры с оптимизацией размера интервалов гистограмм;
- вычисление основных эмпирических моментов распределения геометрических параметров элементов структуры;
- выявление законов распределения геометрических параметров элементов структуры с применением известных критериев согласия [5];
- построение вероятностной 3D-модели структуры ДС по двумерным изображениям с использованием соотношений стереоанализа.

Модуль способен в автоматическом и полуавтоматическом режимах выполнять обработку изображений элементов структуры, имеющих нечеткие границы или границы с разрывами. Для восстановления границ элементов структуры в автоматическом режиме изображение переводится в однобитовый формат с последующим морфологическим анализом [6, 7], позволяющим выявить контуры элементов. В полуавтоматическом режиме выделение неотчетливых границ производится при вмешательстве оператора. В частности, на изображении порошков (рис. 2) показан контур, замыкаемый программой через точки, нанесенные оператором на границу изображения частицы.

Процесс построения программным модулем изображения 3D-модели слоя золя бромида серебра по изображению (рис. 2, б) включает следующие этапы:

- обработка изображения с переводом в однобитовый формат (рис. 3, а);
- размещение в трехкоординатном пространстве (рис. 3, б) центров частиц дисперсной фазы в соответствии с их координатами на изображении проекции и принятым законом распределения частиц по толщине слоя;
- расчет для каждой частицы диаметра эквивалентной по объему сферы;
- размещение каждой эквивалентной сферы в начале координат (рис. 3, в);
- деформация каждой эквивалентной сферы до получения эллипсоида вращения (рис. 3, г) с параметрами, максимально соответствующими данной реальной частице, и поворот большой оси эллипсоида в соответствии с принятым законом распределения частиц по направлениям;
- перемещение центров объемов эллипсоидов в точки с соответствующими координатами (рис. 3, д).

Для достоверного построения вероятностной трехмерной модели ДС типа Т/Т используются статистические параметры, полученные при анализе двумерных изображений структуры трех взаимно перпендикулярных сечений образца ДС. Кроме описанных выше процедур, вводится расчет диаметров эк-

вивалентных сфер с учетом их случайного рассеяния плоскостью, подчиняющийся закономерности, описанной в [4]. Пример построения 3D-модели для образца полистирола (рис. 4) показывает перспективность дальнейшего развития разработанного модуля с ориентацией на большую детализацию и соответствие полученных изображений реальной структуре.

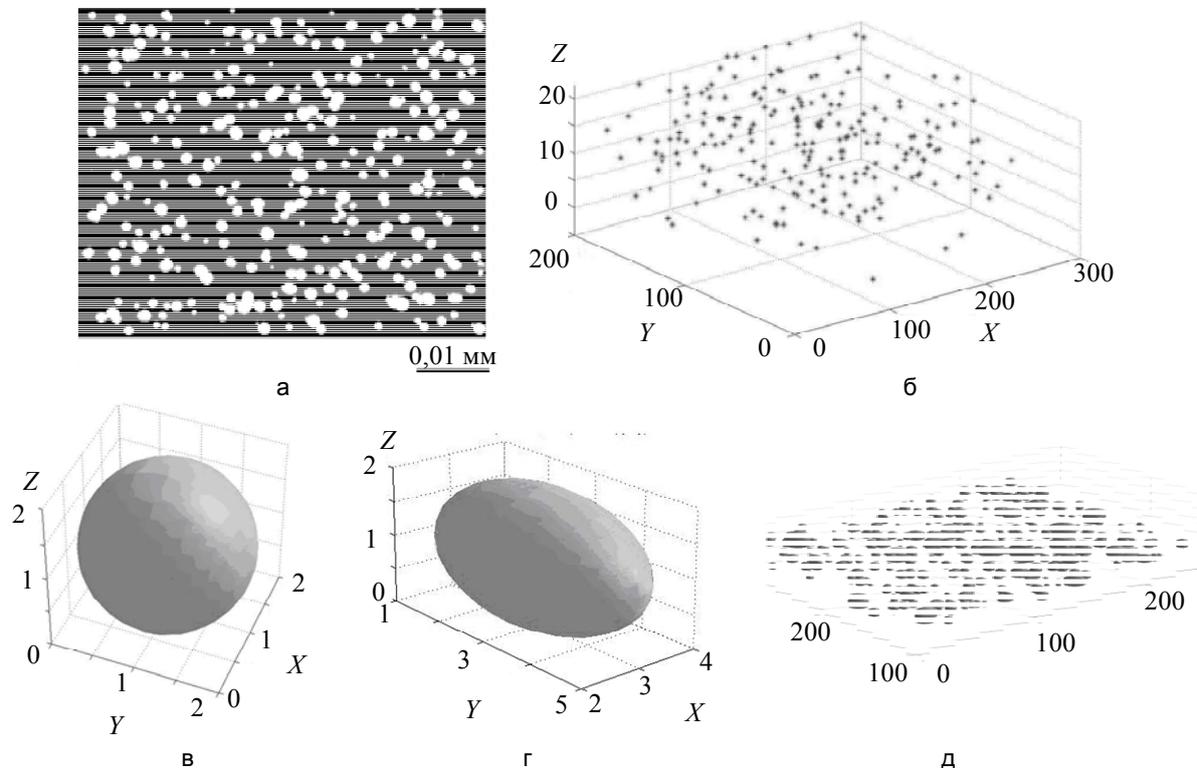


Рис. 3. Результаты этапов создания трехмерной модели слоя золя бромида серебра: изображение двумерной проекции слоя золя в однобитовом формате (а); предполагаемое положение (*) центров частиц золя в трехкоординатном пространстве (б); сфера (в) и эллипсоид (г), эквивалентные объему конкретной частицы золя (шкалы в нанометрах); изображение вероятностной 3D-модели слоя золя (шкалы в нанометрах) (д)

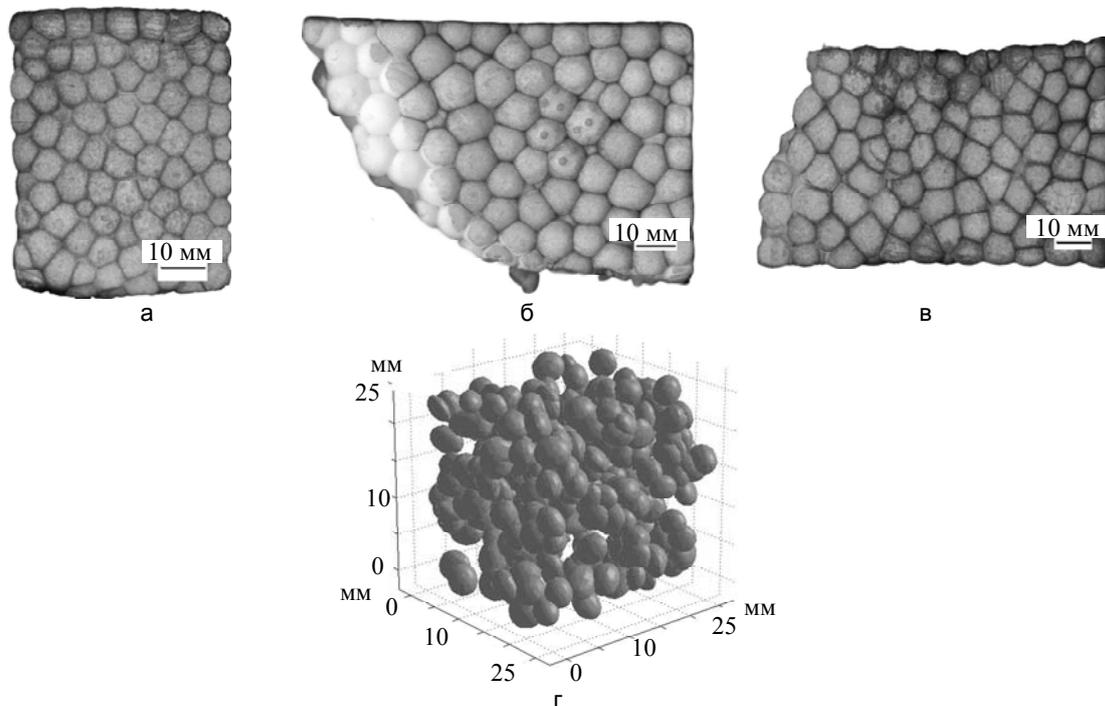


Рис. 4. Изображение вероятностной трехмерной модели структуры пенополистирола (г), созданной с использованием трех плоских, взаимно перпендикулярных сечений: X–Y (а); X–Z (б); Y–Z (в) (шкалы в миллиметрах)

Результаты тестирования модуля

С целью тестирования программного модуля на предмет выявления параметров двумерной структуры ДС и корректности их статистической обработки было выбрано двумерное изображение стандартной феррито-перлитной микроструктуры стали марки 15 (рис. 5, а), по которой оценивается балл зерна поликристалла. После перевода в однобитовый формат и фильтрации (рис. 5, б) к полученному бинарному изображению применялся морфологический анализ. При этом определялись координаты элементов структуры и их границы для последующей оценки геометрических параметров (площадей, периметров, формы). После построения гистограмм, в частности, для корня квадратного из площади зерен феррита ($S^{0,5}$), отражающего их средний размер (рис. 5, в), подбирался теоретический закон распределения с использованием критериев согласия Пирсона и Колмогорова–Смирнова.

Полученные числовые значения параметров структуры стали марки 15 и образцов других сталей из базы данных [8] показали, что применение модуля:

- продемонстрировало (с доверительной вероятностью 0,9) совпадение искомых параметров с их стандартными значениями;
- выявило соответствие вычисленных номеров зерна эталонам [9];
- позволило определить теоретический закон распределения размеров элементов структуры (рис. 5, в), соответствующий логарифмически нормальному распределению, которое является типичным для ДС [10, 11] и дает основу для построения 3D-модели;
- не приводит к потере и искажению информации при обработке изображений.

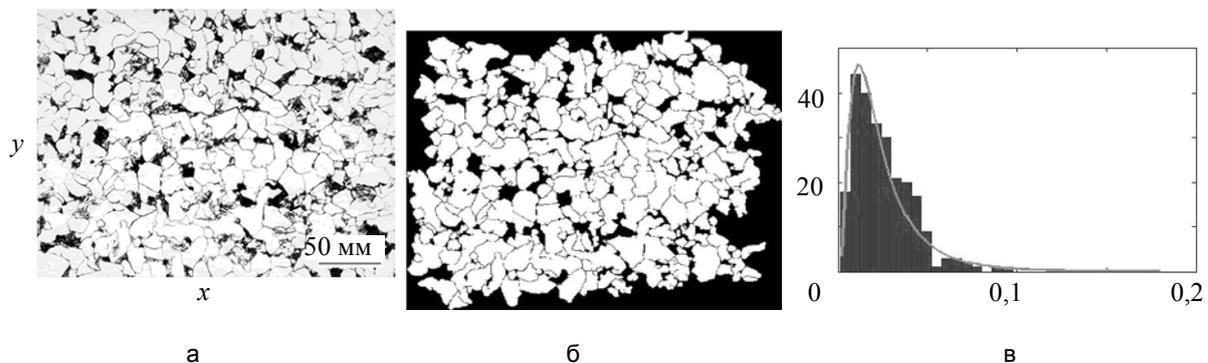


Рис. 5. Стандартная феррито-перлитная структура стали марки 15: до обработки изображения (а); после обработки изображения (б); эмпирическое и теоретическое распределение $S^{0,5}$ (S – площадь зерен феррита), соответствующее логнормальному закону распределения (горизонтальная ось – $S^{0,5}$ в мм; вертикальная ось – количество зерен) (в)

Заключение

Проведенные исследования по разработке программного модуля и анализу результатов его работы позволяет сделать следующие выводы и предположения.

1. На основе универсальной программной среды MATLAB создан доступный, модифицируемый программный модуль стереоанализа структуры дисперсных систем, имеющий все необходимые функции для эффективной обработки двумерных изображений и статистического анализа их геометрических параметров с использованием соотношений стереометрической металлографии для построения вероятностных 3D-моделей дисперсных систем.
2. Описаны основные функции модуля и продемонстрирована корректность его работы на примере анализа структур дисперсных систем различного типа.
3. Новизна работы заключается в разработке на основе программной среды MATLAB модуля, включающего совокупность методов обработки двумерных изображений дисперсных систем для построения 3D-моделей структур на основе вероятностных законов распределения геометрических параметров их элементов.
4. Практическая значимость работы заключается в получении инструмента для построения и изучения изображений трехмерной структуры дисперсных систем на основе вероятностной, статистически обусловленной 3D-модели, позволяющей получить более объективную информацию о структуре дисперсных систем, чем при изучении только двумерных изображений.
5. Перспектива развития данного модуля состоит в дальнейшей детализации воспроизведения формы и размеров элементов структуры при построении вероятностных 3D-моделей и их связи со свойствами дисперсных систем.

Литература

1. Программный пакет SPECTR MET 4.5.5 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.niirn.ru/catalog/show.php?node_id=218, свободный. Яз. рус. (дата обращения 21.09.2012).
2. Программа ImageExpert Pro3 для количественного анализа изображений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nexsys.ru/iepro3x.htm>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 21.09.2012).
3. Программный пакет обработки и анализа изображений металлографии MICROKON MET [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.microkon.ru/program_mmet.html, свободный. Яз. рус. (дата обращения 21.09.2012).
4. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1976. – 270 с.
5. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. – 573 с.
6. Дьяконов В. MATLAB. Основы обработки сигналов и изображений. – СПб: Питер, 2002. – 608 с.
7. Консультационный центр MATLAB [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 21.09.2012).
8. База данных микроструктур металлов и сплавов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.microstructure.ru>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 21.09.2012).
9. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – Введ. 01.01.83. – 21 с.
10. Лемешко Б.Ю., Чимитова Е.В. О выборе числа интервалов в критериях согласия типа χ^2 // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2003. – Т. 69. – № 1. – С. 61–67.
11. Колмогоров А.Н. О логарифмически нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении // Доклады АН СССР. – 1941. – Т. 31. – № 2. – С. 99–101.

- Калинин Антон Павлович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, formant2004@mail.ru
- Манойлов Владимир Владимирович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, доцент, профессор, manoilov_vv@mail.ru
- Приходько Олег Анатольевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, oap10@yandex.ru