

---

---

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ  
И МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ**

---

---

УДК 681.2 –5

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

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ  
ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ТРЕХМЕРНОГО  
СТЕРЕОАНАЛИЗА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Целью данной работы является разработка методики и алгоритмов математической обработки изображений для построения трехмерных моделей металлических структур с использованием статистических параметров их двумерных изображений. В качестве объектов исследования были выбраны несколько металлических образцов, представленных в виде многогранников. Изучение данных металлических образцов позволило протестировать метод восстановления трехмерной структуры по двумерным изображениям трех плоских срезов, полученных по технологиям подготовки микрошлифов.

*Кл. сл.:* моделирование, микроструктуры, зерна металла, обработка изображений, стереоанализ, дисперсные системы, микроскопия, статистические характеристики структур материалов

**ВВЕДЕНИЕ**

Для прогнозирования свойств металлических материалов немаловажен анализ сечений реальных структур и моделирование по одномерным и двумерным следам структурных особенностей трехмерных структур [1]. В настоящее время реализуются три методики оценки микроструктуры: качественно-описательная, полуколичественная (балловая оценка по сравнению со структурами стандартных шкал) и строго количественная оценка геометрических параметров микроскопического строения. Наиболее эффективной является количественная оценка структуры с применением статистического подхода к анализу ее геометрических параметров с учетом ее трехмерного строения.

Количественные данные о статистических геометрических параметрах микроструктуры позволяют воспользоваться математическим аппаратом и вычислительной техникой для получения достоверных зависимостей между свойствами, структурой, составом и обработкой материала. Эти зависимости позволяют выявить физическую природу процессов, протекающих в структуре при обработке и эксплуатации, причину изменений свойств с изменением состава и обработки. При использовании таких зависимостей появляется возможность выбрать оптимальный состав, наилучшую технологию получения и обработки, обеспечивающие создание нужной структуры и, следовательно, требуемых свойств. Целью настоящей работы является разработка и исследование алгоритмов обработки изображений, которые позволили бы определять трехмерные геометрические параметры структуры материалов по статистически обусловленным вероятностным 3D-моделям, по-

строенным на основе анализа элементов двумерных изображений структур.

Знание статистических параметров трехмерной структуры сплавов, таких как дисперсная среда (ДС) типа Т/Т (твердые элементы в твердой среде), позволит:

- 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;

- выбрать оптимальный состав, наилучшую технологию получения и обработки, обеспечивающие создание нужной структуры и, следовательно, требуемых свойств сплавов.

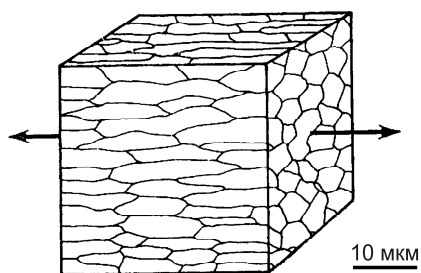
**ОГРАНИЧЕНИЯ, ПРИСУТСТВУЮЩИЕ  
ПРИ АНАЛИЗЕ СТРУКТУРЫ ДС  
ПО ДВУМЕРНЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ**

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

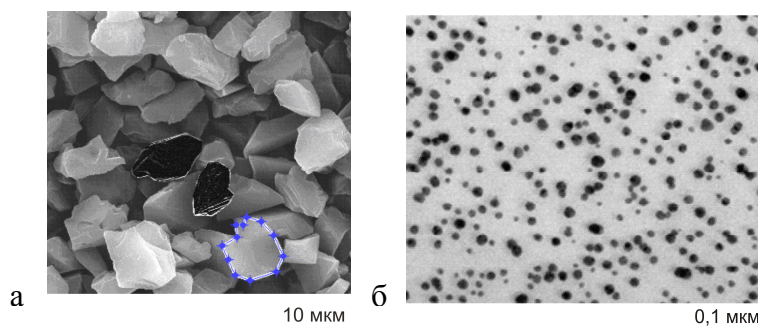
Однако рассмотрение отдельных двумерных изображений создает лишь приблизительное представление о действительном строении трехмерной структуры [2], т. к.

- 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,



**Рис. 1.** Двумерные изображения (на гранях) структуры условного образца при различной ориентации плоскости шлифа (грани). Стрелками показано направление текстуры поликристалла



**Рис. 2.** Изображения двумерной проекции порошка (а) и слоя золя (б).

На рис. 2, а, в полуавтоматическом режиме точками и контуром обведены нечеткие границы частицы

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, т. к. частицы могут быть вытянуты вглубь слоя и иметь сложную форму. Неизбежно также заслонение частиц друг другом.

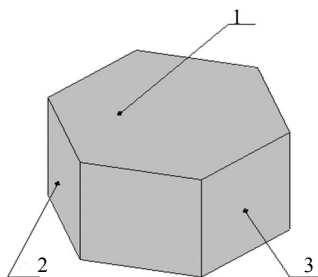
Несмотря на отмеченные ограничения, параметры двумерных изображений применяют для изучения структуры и свойств ДС [3–5], однако более объективную оценку структуры и свойств можно получить, используя сведения о трехмерной структуре этих систем.

Без разрушения образцов такие сведения можно получить при изучении вероятностной, статистически обусловленной 3D-модели ДС, постро-

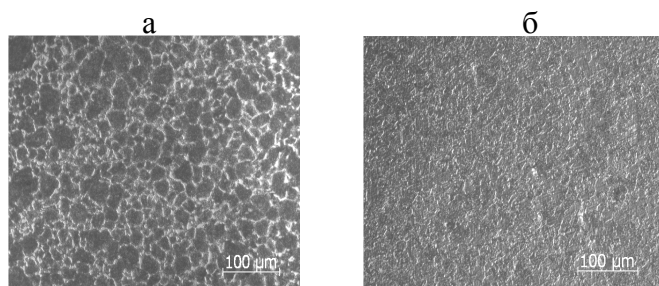
енной на основе соотношений, используемых в стереометрической металлографии [1]. Так как методы стереометрической металлографии являются статистическими, то анализируемые ДС должны представлять собой статистически значимую совокупность элементов. В настоящей работе представлены результаты разработки и выявления возможностей программного обеспечения, которое на основе статистической оценки параметров двумерных изображений ДС позволяет изучать трехмерную структуру материалов.

## ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

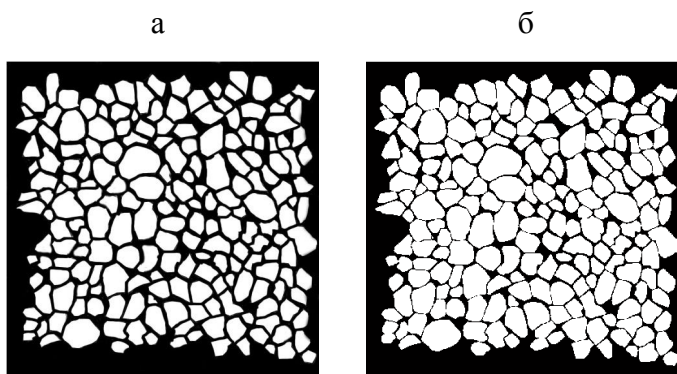
В качестве объектов исследования были выбраны несколько металлических образцов, представленных в виде многогранников (рис. 3). Изучение данных металлических образцов позволило протестировать метод восстановления трехмерной структуры по двумерным изображениям трех плоских срезов, полученных путем подготовки микрошлифов.



**Рис. 3.** Модель образца металлического материала.  
1, 2, 3 — поверхности, используемые для получения микрошлифа



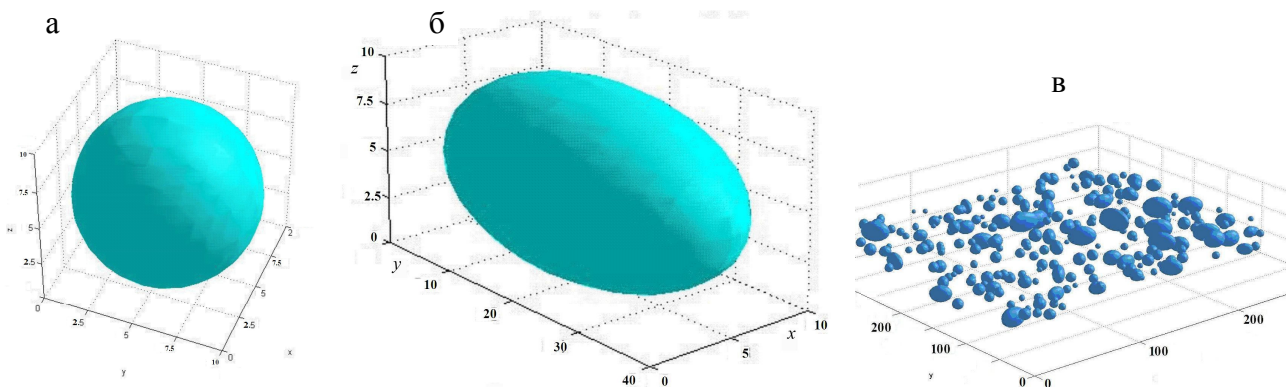
**Рис. 4.** После химического травления.  
а — 4 %-м спиртовым раствором  $\text{HNO}_3$ ; б — 10 %-м спиртовым раствором  $\text{HNO}_3$



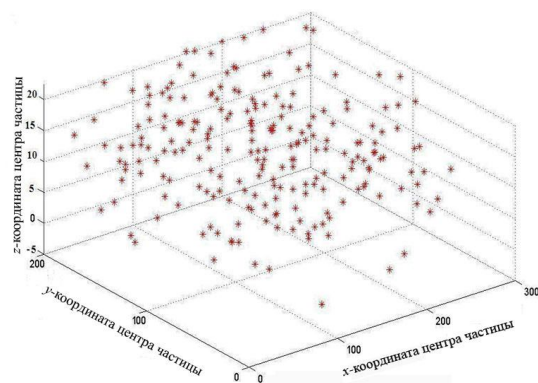
**Рис. 5.** Изображения двумерной проекции слоя частиц в бинарном представлении. а — до применения фильтра thicken, б — после применения фильтра thicken

В процессе исследования выполнялась следующая последовательность действий: подготовка микрошлифа (шлифование, полирование, травление); снятие изображений микрошлифа (в данной работе применялся оптический микроскоп Carl Zeiss Axio Observer D1); с учетом рекомендаций [6] в качестве травителя был использован спиртовой раствор  $\text{HNO}_3$ . Установлено, что для исследуемых образцов 4 %-й спиртовой раствор  $\text{HNO}_3$  (время травления 3–8 с) лучше выявляет границы зерен (рис. 4).

Используя основные стереометрические соотношения [7], а также аппарат математической статистики [2], программный модуль, описанный авторами в работах [8, 9], осуществляет построение вероятностной статистически обусловленной (ВСО) 3D-модели как слоя частиц (зерен) по анализу одного среза, так и объема частиц по анализу трех срезов.



**Рис. 7.** Построение макетов частиц. а — сфера и б — эллипсоид, эквивалентные объему частицы (шкалы в микрометрах); в — изображение вероятностной 3D-модели слоя частиц (шкалы в микрометрах)



**Рис. 6.** Предполагаемое положение центров частиц в трехкоординатном пространстве, в микрометрах

### ЭТАПЫ ОБРАБОТКИ ДВУМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ТРЕХМЕРНЫХ СТРУКТУР

Процесс создания трехмерной модели структуры материала по двумерному изображению (рис. 4, а) разделяется на следующие этапы:

- математическая обработка изображения с выполнением операций масштабирования, пространственной и частотной фильтрации и перевод изображения в однобитовый формат [10] (рис. 5, а). При этом для снижения погрешности при измерении площадей частиц и их диаметров существует возможность использовать различные фильтры морфологической обработки бинарного изображения (рис. 5, б);
- установка в трехкоординатном пространстве (рис. 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;
- построение эквивалентных сфер в начале координат (рис. 7, а);
- деформация эквивалентных сфер до получения эллипсоидов вращения (рис. 7, б) с параметрами, максимально приближенными к реальным частицам, и поворот большой оси эллипсоидов в соответствии с принятым законом распределения частиц по направлениям;
- перемещение центров объемов эллипсоидов в точки с соответствующими координатами (рис. 6), формируя первичный вариант изображения 3D-модели слоя частиц (рис. 7, в).

### СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

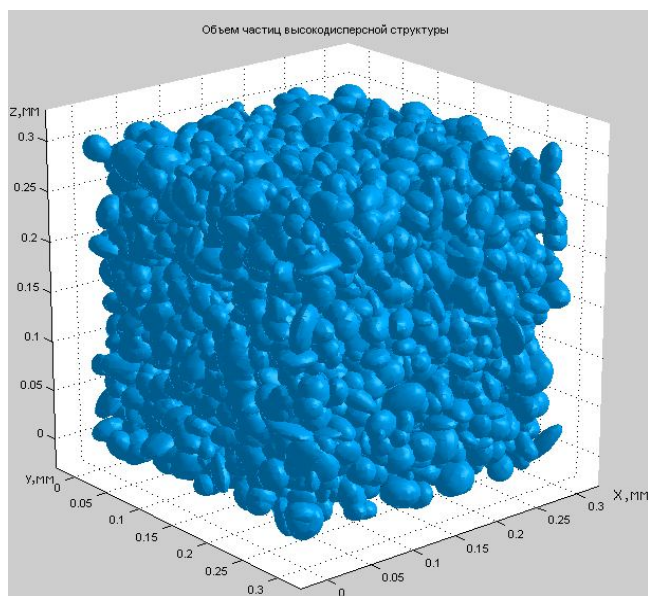
Для наиболее достоверного построения вероятностной трехмерной модели ДС используются статистические параметры, полученные при анализе двумерных изображений структуры трех сечений образца ДС. Описанная выше процедура дополняется сведением в один массив данных информации о законах распределения геометрических параметров частиц ДС по каждой из трех взаимно-перпендикулярных плоскостей. Подбор теоретических законов распределений, соответствующих эмпирическим данным, производится

согласно правилам Колмогорова—Смирнова и Пирсона. Рассчитываются доверительные интервалы для моментов распределения [11]. На основе значений среднего диаметра частиц в каждом монослое по каждому направлению в выбранной системе координат рассчитывается среднее количество частиц в заданном пользователем объеме. Производится равномерное заполнение частицами заданного объема (рис. 8).

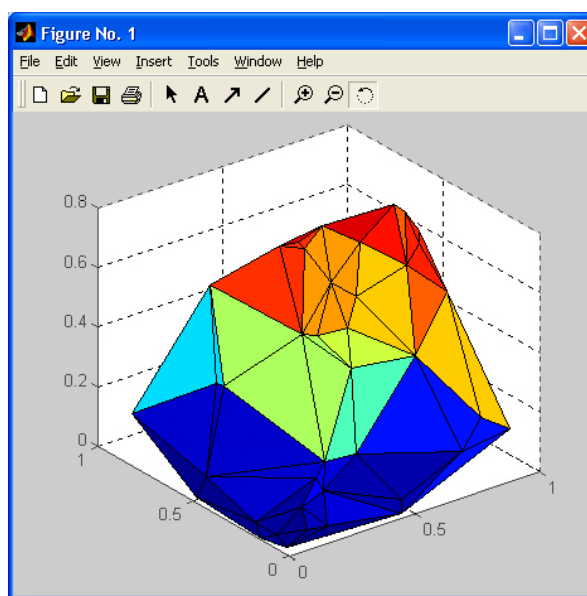
Анализ размеров частиц необходим в любой отрасли промышленности, где производятся или обрабатываются металлы (черные и цветные), их сплавы, сталь и неметаллические материалы (например, керамика).

### ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ

Комплексная методика изучения материалов с использованием разработанного программного обеспечения на основе среды MatLab позволяет в режиме реального времени создать вероятностную модель трехмерной структуры по статистическим параметрам двумерных изображений образцов материалов. В качестве перспективного направления исследований для данной работы можно рассмотреть возможность построения ВСО

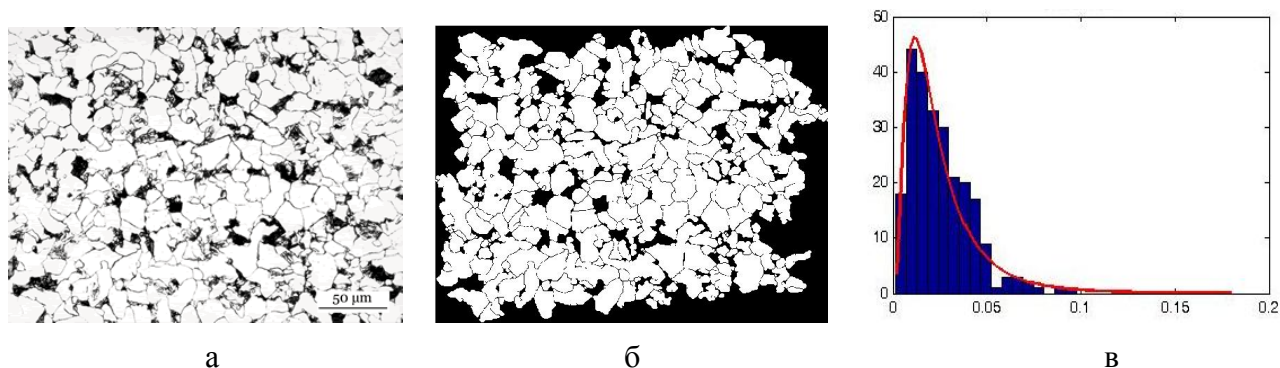


**Рис. 8.** Изображение вероятностной трехмерной модели металлической структуры, восстановленной по трем граням образца



**Рис. 9.** Пример тела произвольной формы





**Рис. 10.** Пример определения параметров ДС по двумерному ее изображению для стандартной феррито-перлитной структуры стали марки 15.

а — изображение до обработки; б — после обработки изображения; в — 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)

3D-модели системы частиц произвольной (отличной от эллипсоида) формы (рис. 9).

Такая модель позволит наиболее точно оценить взаимное расположение частиц в небольшом объеме. Методы, описанные в [9], позволят расширить функциональность разработанного модуля и дадут возможность повысить достоверность трехмерных моделей.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

С целью тестирования разработанной методики модуля по выявлению параметров двумерной структуры ДС и корректности их статистической обработки было выбрано двумерное изображение стандартной феррито-перлитной микроструктуры стали марки 15 (рис. 10, а), по которой оценивается балл зерна поликристалла. После перевода в однобитовый формат и фильтрации (рис. 10, 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. 10, 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 [6] показали, что применение программного модуля [8]

—дает совпадение искомых параметров с их стандартными значениями (с доверительной вероятностью 0.9);

—выявило соответствие вычисленных номеров зерна эталонам [9, 12];

—позволило определить теоретический закон распределения размеров элементов структуры (рис. 10, в), соответствующий логарифмически нормальному распределению, которое является типичным для ДС [13, 14], и дает основу для построения 3D-модели;

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные данные по использованию предлагаемой методики показывают корректность ее работы при анализе структур ДС различного типа. Практическая значимость методики заключается в получении инструмента для построения и изучения изображений трехмерной структуры ДС на основе вероятностной, статистически обусловленной 3D-модели, позволяющей получить более объективную информацию о структуре ДС, чем при изучении только двумерных изображений.

Перспектива развития данной методики состоит в дальнейшей детализации воспроизведения формы и размеров элементов структуры при построении вероятностных 3D-моделей и изучении их связи со свойствами дисперсных систем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1976. 270 с.
2. Дьяконов В. MATLAB. Основы обработки сигналов и изображений. СПб.: Питер, 2002. 608 с.
3. Grain Analysis. URL: (<http://gwyddion.net/documentation/user-guide-en/grain-analysis.html>).
4. Grain Size Analysis in Metals and Alloys. URL: (<http://www.olympus-ims.com/ru/applications/grain-size-analysis/>).

5. *Diógenes A.N., Hoff E.A., Fernandes C.P.* Grain size measurement by image analysis: An application in the ceramic and in the metallic industries // 18th International Congress of Mechanical Engineering, November 6–11, 2005, Ouro Preto, MG.  
URL: (<http://www.lmpt.ufsc.br/publicacao/119.pdf>).
6. *Колмогоров А.Н.* О логарифмически-нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении // Доклады АН СССР. 1941. Т. 31, № 2. С. 99–101.
7. *Кремер Н.Ш.* Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. 573 с.
8. *Калинин А.П., Манойлов В.В., Приходько О.А.* Программный модуль для оценки параметров дисперсных систем по их изображениям для количественного трехмерного стереоанализа // Научно-технический вестник университета информационных технологий, механики, оптики. 2012. № 6. С. 101–106.
9. *Калинин А.П., Манойлов В.В., Приходько О.А.* Обработка изображений дисперсных систем для количественного трехмерного стереоанализа // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. М.: РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2013. Ч. 1, вып. XV. Доклады 15-й Международной конференции: Цифровая обработка сигналов и ее применение — DSPA-2013.
10. База данных микроструктур металлов и сплавов  
URL: (<http://www.microstructure.ru>).
11. *Лемешко Б.Ю., Чимитова Е.В.* О выборе числа интервалов в критериях согласия типа  $\chi^2$  // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2003. Т. 69, № 1. С. 61–67.
12. ГОСТ 5639-82 Методы выявления и определения величины зерна. Москва, 1983.
13. *Коваленко В.С.* Металлографические реактивы: Справочник. 2 изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1981. 120 с.
14. Трехмерная графика с треугольными плоскостями. Иллюстрированный самоучитель по MatLab.  
URL: (<http://samoucka.ru/document21563.html>).

**Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики** (Калинин А.П., Приходько О.А.)

**Институт аналитического приборостроения РАН, г. Санкт-Петербург** (Манойлов В.В.)

Контакты: *Манойлов Владимир Владимирович*,  
manoilov\_vv@mail.ru

Материал поступил в редакцию: 27.10.2014

## METHODS OF ESTIMATING THE PARAMETERS OF DISPERSED IMAGES FOR QUANTITATIVE THREE-DIMENSIONAL ANALYSIS OF METALLIC MATERIALS

A. P. Kalinin<sup>1</sup>, V. V. Manoylov<sup>2</sup>, O. A. Prikhodko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ITMO UNIVERSITY, Saint-Petersburg, RF

<sup>2</sup>Institute for Analytical Instrumentation of RAS, Saint-Petersburg, RF

The aim of this work is to show the possibilities of mathematical image processing algorithms for constructing three-dimensional models of metal structures using statistical parameters of two-dimensional images. The objects of investigation were several metal samples submitted in the form of polyhedra. Studying these metallic samples allowed to test a method of restoring the three-dimensional structure on two-dimensional images of three planar slices obtained technology training microsections.

*Keywords:* modeling, microstructure, metals grains, image processing, stereoanaliz, disperse systems, microscopy, statistical characteristics of materials structures

**REFERENCES**

1. Grain Analysis. URL: (<http://gwyddion.net/documentation/user-guide-en/grain-analysis.html>).
2. Grain Size Analysis in Metals and Alloys. URL: (<http://www.olympus-ims.com/ru/applications/grain-size-analysis/>).
3. *Diógenes A.N., Hoff E.A., Fernandes C.P.* Grain size measurement by image analysis: An application in the ceramic and in the metallic industries // 18th International Congress of Mechanical Engineering, November 6–11, 2005, Ouro Preto, MG. URL: (<http://www.lmpt.ufsc.br/publicacao/119.pdf>).

Contacts: *Manoylov Vladimir Vladimirovich*,  
manoilov\_vv@mail.ru

Article arrived in edition: 27.10.2014