

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РФ
НАБЕРЕЖНОЧЕЛНИНСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)
ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ)
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕ-
ТОДАМИ АВТОМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА
ИЗОБРАЖЕНИЯ ImageExpert Pro 3 И Im-
ageExpertSample 2**

*Методические указания к выполнению лабораторной
работы по курсу «Методы исследования, контроля и
испытания материалов»*

Набережные Челны
2019

Исследование микроструктуры методами автоматического анализа изображения **ImageExpert Pro 3** и **ImageExpertSample 2**: Методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу «Методы исследования материалов и процессов» / сост. А.Г. Панов, И.Ф.Шаехова - Набережные Челны: НЧИ (ф) КФУ, 2019, 63 с.

Методические указания предназначены студентам и слушателям специальности 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов» и 15.03.01 Машиностроение для выполнения лабораторной работы по общепрофессиональной дисциплине «Методы исследования, контроля и испытания материалов»

Рецензент: к.т.н., доцент, доцент кафедры «Материалы, технологии и качества» НЧИ КФУ Шафигуллин Л.Н.

@ НЧИ (ф) КФУ
2019 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ	5
2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИБОРЫ, ИНСТРУМЕНТЫ И МАТЕРИАЛЫ	5
3. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ	5
4. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	6
5. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ	45
6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	58
ПРИЛОЖЕНИЯ	59
ЛИТЕРАТУРА	63

ВВЕДЕНИЕ

Цель лабораторной работы – закрепить у студентов (слушателей) знания по стереологическим методам исследования материалов и развить практические навыки количественной металлографии с использованием перспективных компьютерных методов автоматического анализа изображения.

Работы выполняются в условиях измерительной лаборатории кафедры «Материалы, технологии и качества». К проведению лабораторной работы допускаются студенты, прошедшие инструктаж по охране труда и технике безопасности, а также обучение безопасным методам труда на соответствующем оборудовании, используемом при выполнении работ.

Студенты знакомятся с целью, содержанием и порядком работы по настоящим методическим указаниям, изучают рекомендуемую литературу.

Перед началом работы преподаватель проводит собеседование с каждым студентом и допускает к работе, если студент показал достаточные знания теоретического материала, цели, порядка выполнения и правил техники безопасности.

По выполненной работе студент составляет индивидуальный отчёт в соответствии с требованиями данных методических указаний.

Лабораторная работа

Исследование микроструктуры методами автоматического анализа изображения ImageExpert Pro 3 и ImageExpertSample 2

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель работы: ознакомиться с техникой компьютерных методов получения, обработки и анализа цифровых изображений микроструктуры, получить навыки работы с автоматическими анализаторами изображений (ААИ) ImageExpert Pro 3 и ImageExpertSample 2, закрепить навыки применения методов статистической обработки результатов измерений

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИБОРЫ, ИНСТРУМЕНТЫ И МАТЕРИАЛЫ

В работе используются образцы графитированных чугунов с шаровидным графитом (ООО «Исследовательский центр Модификатор», г. Наб. Челны), оправки для заливки образцов, заливочные (эпоксидные) материалы, шлифовальные и полировальные материалы (ф. BUEHLER, США), шлифовально-полировальная установка ВЕТА/1+VECTOR (ф. BUEHLER, США), оптический микроскоп МИМ-10 (ОАО ЛОМО, г. Ленинград) или НЕОРНОТ-32 (ф. Carl Zeiss, Jena, ГДР), ААИ ImageExpertPro 3 и ImageExpertSample 2 с системой сканирования изображения (ООО «Новые экспертные системы», г. Москва), персональные компьютеры с ОС «Windows» (к. Microsoft)

3. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Лабораторная работа включает следующие этапы:

1) Теоретико-методологический анализ исследуемой области.

2) Ознакомление с демонстрационной версией автоматического анализатора изображения (ААИ) ImageExpert Pro 3.

3) Подготовка микрошлифов образцов (вырезка, заливка, выравнивание, шлифовка, полировка).

4) Исследование микрошлифов с помощью оптического микроскопа, получение цифрового изображения микроструктуры.

5) Обработка изображения с помощью цифровых фильтров анализатора изображения ImageExpert Pro 3 и расчёт количественных характеристик графита.

6) Оценка характеристик графита с помощью анализатора изображения ImageExpertSample 2 в соответствии с требованиями ГОСТ 3443.

7) Сравнительный анализ методов количественной оценки характеристик микроструктуры графита ImageExpert Pro 3 и ImageExpertSample 2.

8) Подготовка отчета по лабораторной работе.

9) Защита лабораторной работы.

4. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Большинство исследований материалов и процессов так или иначе включают определение характеристик их макро- и микроструктуры методами стереологии. Современная стереология – область прикладной математики, формулирующая характеристики геометрической структуры объектов различного происхождения и разрабатывающая способы их определения (реконструкции) на основании простых измерений, выполняемых на плоскости наблюдения [1]. Под «геометрической структурой» в стереологии понимают совокупность точечных, линейных, поверхностных и объёмных элементов, определённым образом размещённых в пространстве.

Применяемые для исследований микроструктуры ма-

териалов методы стереологии и их техника достаточно многообразны и зависят от свойств материалов, размеров образцов и решаемых при исследованиях задач.

В настоящее время наиболее часто исследование структуры в машиностроении методами стереологии применяется для металлических материалов и сплавов (металлография) и минералов (петрография). Исследование структуры композиционных материалов в настоящее время носит зачаточный характер и распространяется, в основном, на литые композиционные материалы. Рассмотрим методы исследования микроструктуры на примере металлографии.

Металлография является стереологическим методом качественного и количественного исследования структуры металлов и сплавов. Качественные (описательные) методы исследования структуры позволяют описать с помощью баллов или условных обозначений тип, форму, размер и взаимное расположение обнаруженных фаз и структурных составляющих методом сравнения с ранее разработанными эталонами микроструктур. Задача количественной металлографии состоит в изучении характеристик пространственного строения структуры путем измерения численных параметров микроскопического изображения.

Основные операции количественной металлографии – подсчет, измерение и классификация элементов, находящихся в поле зрения. Под элементами пространственного микроскопического строения понимаются различные микрочастицы (зёрна, кристаллиты, включения, выделения и др.), а также точечные, линейные, ареальные (плоскостные) образования (точки, линии и поверхности стыка микрочастиц). Результатом операций количественной металлографии могут быть, в частности, количественные параметры зерна или объемные доли различных фаз в структуре сплава. Более широкий перечень параметров структуры, приня-

тый автором [2], приведён в качестве примера в приложении 1.

Основные методы количественной металлографии следующие [2]:

1. методы количественного фазового и структурного объёмного состава:
 - а. планиметрический,
 - б. линейный (Розеваля);
 - с. точечный (Глаголева),
2. методы измерения граничных поверхностей раздела зёрен, фаз и структурных составляющих:
 - а. измерение суммарной длины линий методами случайных и направленных секущих для плоскости,
 - б. измерение параметров поверхности методами случайных и направленных секущих и контуров для пространства;
3. методы измерения протяжённости линейных элементов пространственного строения:
 - а. метод случайных секущих плоскостей;
4. методы определения количества микрочастиц в объёме и распределения их по размерам:
 - а. методы определения общего количества плоских зёрен на единице площади шлифа (планиметрирование, подсчёт узловых точек, подсчёт пересечений линейных контуров и отрезков),
 - б. дифференцированная оценка плоских зёрен по величине и количеству (планиметрирование),
 - с. метод обратных диаметров определения количества шаровидных зёрен в единице объёма,

- d. методы расчёта распределения размеров (диаметров) шаровидных частиц (Шайля-Шварца-Салтыкова, логарифмов диаметров Салтыкова, хорд, укрупнённых показателей),
 - e. метод расчёта распределения размеров не-сферических частиц Салтыкова;
5. методы количественной оценки формы микрочастиц и неоднородности структуры:
- a. расчёт одномерного фактора формы (по диаметрам Фере, Мартина)
 - b. расчёт двухмерного фактора формы,
 - c. расчёт трёхмерного фактора формы,
 - d. оценка угловых элементов формы,
 - e. оценка фрактальной размерности формы
 - f. оценка дисперсии случайной величины геометрических характеристик микрочастиц,
 - g. оценка анизотропии методом сравнения дисперсий случайных величин линейных размеров микрочастиц, измеренных вдоль различных направлений.

Таким образом, стереологические методы количественной оценки элементов микроструктуры достаточно многочисленны и разнообразны. При этом автор [2] отмечает, что если величины характеристик, получаемых при измерениях на плоскости первыми тремя группами методов, имеют хорошую корреляцию с исследуемыми пространственными характеристиками элементов, то для 4 и 5 групп методов в общем случае такой однозначной зависимости не существует. Причём наименее разработанной областью количественной металлографии является оценка неоднородности структуры. Поэтому в настоящее время единственным способом повышения точности определения

значения характеристик количества, распределения и формы микрочастиц является увеличение площади исследования микроструктуры.

Для выполнения металлографических исследований необходимы специально подготовленные образцы – металлографические шлифы. Исследования микроструктуры этих образцов проводят с помощью микроскопов, работающих в отраженном свете.

Изготовление образцов для оптической микроскопии включает следующие операции: вырезка образца, шлифование, полирование, травление (при необходимости). Место вырезки выбирают так, чтобы образец был типичен для данной детали. При неоднородной структуре образцы вырезают из каждой характерной зоны.

В настоящее время оборудование и техника вырезки образцов достигли высокого уровня, позволяющего вырезать достаточно ровные и гладкие образцы из любой по геометрии заготовки с минимальными искажениями микроструктуры на поверхности реза и требующими минимальной последующей шлифовки и полировки.

Образцы для оптической микроскопии целесообразно вырезать на специальных отрезных станках алмазными и эльборовыми кругами. Для резки твердых материалов рекомендуется использовать более мягкие отрезные круги, а для пластичного основного металла отрезные круги должны быть твердые. При вырезке образцов из деталей с покрытием всегда следят за тем, чтобы режущий инструмент двигался от покрытия к основному металлу. В противном случае вероятность отслоения покрытия увеличивается из-за возникновения растягивающих напряжений при выходе инструмента к поверхности. Чтобы избежать искажений структурного состояния образца в процессе вырезки, стараются избежать нагрева образцов до высоких температур (с помощью применения охлаждающей жидкости).

Быстро и качественно пробы можно вырезать абразивно-проволочной пилой или электроискровым способом. В первом случае в зону трения металлической проволоки и исследуемого материала непрерывно подается абразивная суспензия. Во втором случае между медным электродом и материалом создается электроискровой разряд, разрушающий металл. Оба способа обеспечивают хорошую чистоту поверхности и не искажают исходную структуру.

Для предотвращения “завала” кромок и увеличения опорной поверхности поперечного шлифа рекомендуется заливать образцы легкоплавкими сплавами. Например, сплав Вуда (Bi, Pb, Sn, Cd) имеет температуру плавления $T_{пл} = 100$ °С, при добавке кадмия $T_{пл}$ снижается до 68 °С. Можно также использовать эпоксидные смолы, органическое стекло, полистирол. Образцы перед заливкой устанавливают в цилиндрических оправках высотой 10–20 мм и диаметром 20–30 мм.

На машиностроительных предприятиях нашей страны, к сожалению, до сих пор изготовление шлифа начинают с грубого выравнивания поверхности образца на заточном станке. Затем поверхность шлифуют вручную на плоском стекле, покрытом абразивной шкуркой, либо на вращающемся диске с приклеенной к нему шкуркой. Образец обрабатывают, последовательно переходя от грубой шкурки к более мелкой с увеличением дисперсности абразивных частиц от 160 – 120 до 20 – 14 мкм. Во время шлифования каждой шкуркой целесообразно сохранять одно и то же положение образца, контролируя параллельность рисок.

Чрезмерное давление на образец при шлифовании сопровождается нежелательным выделением тепла, преждевременным износом абразивных кругов, выкрашиванием дисперсных частиц из образца, появлением прижогов. При смене шкурки необходимо тщательно очищать образец от частичек абразива, промывая его водой и обдувая теплым

воздухом. При переходе на другую шкурку шлиф следует поворачивать на 90° , а также проверять, все ли риски, нанесенные при обработке предыдущей шкуркой, устранены.

Риски, оставшиеся от шлифования на последней шкурке, устраняют полированием. Используют вращающийся металлический диск с натянутой или приклеенной тканью. Суспензию дисперсных частиц оксида хрома в воде подают в зону контакта поверхности образца и ткани. Хорошее качество образцов получается при использовании пасты ГОИ, в состав которой входят оксид хрома, стеарин, керосин, олеиновая кислота и сода. Существует также широкий набор паст на основе порошков из синтетического алмаза и эльбора с различной зернистостью. Полирование считается удовлетворительным, если при 300-кратном увеличении не видны риски.

В настоящее время в нашей стране на наиболее передовых предприятиях металлургической отрасли для массового изготовления шлифов применяют специальные шлифовально-полировальные установки, позволяющие в автоматическом или полуавтоматическом режиме работы резко снизить трудоёмкость и повысить производительность труда, улучшить санитарно-гигиенические условия работы и значительно повысить качество получаемой после шлифовки поверхности, необходимое и достаточное для последующего получения чёткого цифрового изображения с возможностью его компьютерной обработки и анализа.

Возможна полировка металлических образцов в электролитической ванне. Но при этом надо иметь в виду, что можно столкнуться с разной скоростью анодного растворения фазовых составляющих образца. Кроме того, отрицательное влияние на качество шлифа могут оказать краевые эффекты и преимущественное травление вокруг пор.

Для изучения микроструктуры металлов используют металлографические микроскопы. Принципиальная схема

оптического микроскопа представлена на рис.1. Подготовленный соответствующим образом шлиф *1* помещают перпендикулярно оптической оси микроскопа в плоскости, совпадающей с передней главной фокальной плоскостью объектива *2*.

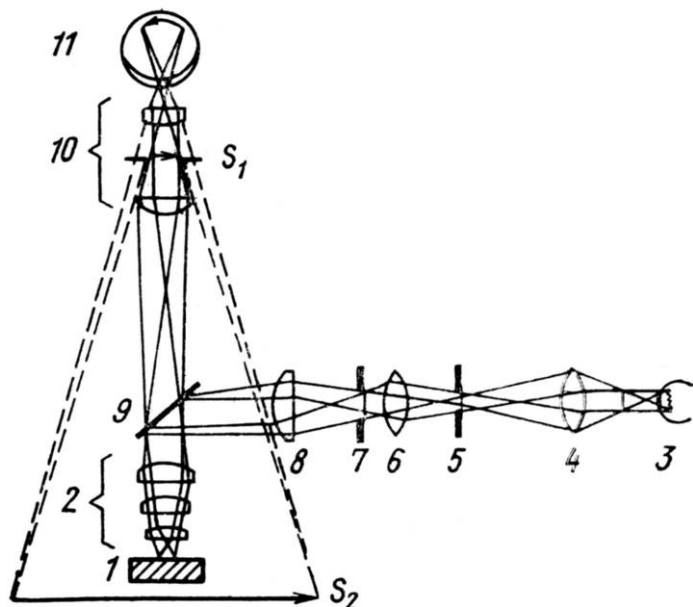


Рис. 1. Принципиальная схема оптического микроскопа

Шлиф освещается проходящим через объектив почти параллельным оптической оси пучком света, который формируется посредством осветительной системы, состоящей из источника (лампы) *3*, коллекторной линзы *4*, апертурной *5* и полевой *7* диафрагм, вспомогательных линз *6*, *8*, и полупрозрачной пластинки *9*. Световые лучи, отражающиеся от участков поверхности шлифа, приблизительно нормальных оптической оси микроскопа, попадают в объектив, а те лучи, которые отражаются под углом от неровностей поверхности, не попадают в его поле. На конечном изобра-

жении поверхности шлифа, создаваемом окуляром 10, все отражающие свет участки, перпендикулярные оптической оси микроскопа, оказываются светлыми, а участки, наклонённые к оси, – тёмными. Благодаря этому выявляются различные элементы структуры металла, например, границы зёрен, которые обычно при подготовке шлифа вытравливаются в канавки, или выступающие частицы твёрдых выделений, включения и поры.

Максимальное увеличение оптических приборов не превышает обычно 1500. В отдельных случаях при использовании ультрафиолетовых лучей или в иммерсионном режиме рабочее увеличение достигает 1700. В оптических микроскопах невозможно исследовать образцы с глубоким рельефом.

В течение многих лет основными поставщиками металлографических микроскопов для ЦЗЛ российских металлургических, металлообрабатывающих, машиностроительных и других предприятий подобного профиля были отечественное оптико-механическое объединение ОАО ЛОМО (г. Ленинград) и немецкая фирма «Carl Zeiss, Jena» (ГДР) [3]. К разработкам ЛОМО 70-х годов относятся инвертированные микроскопы моделей ММР2, МИМ 8, МИМ 9; фирмы «Carl Zeiss» - NEOFOT 2, 21, 23, 31, 32, 33. Разработки 80-х годов возглавляют микроскопы «Carl Zeiss, Jena» – JENAFOT 2000 и отечественный микроскоп МИМ-10. Прямые микроскопы обычно представлены цейсовскими микроскопами NU2, EPIGNOST (70-х годов) и JENAVERT (80-х годов).

Эксплуатируемые в течение 20-30 лет, эти модели микроскопов до сих пор находятся на вооружении измерительных заводских лабораторий. Однако по отечественному ГОСТу на микроскопы, а также в соответствии с международным стандартом ISO 9000 срок годности микроскопа по качеству изображения определен в 10 лет. Неуди-

вительно, что механические части микроскопов (фокусирующий механизм, предметный стол), а также бинокулярные насадки и микрообъективы постепенно начинают выходить из строя. При этом запчасти к этим микроскопам достать тяжело, а зачастую и вовсе невозможно. Для отечественной оптической промышленности это связано с прекращением выпуска старых моделей и сокращением производства усовершенствованных моделей микроскопов. Для зарубежных микроскопов отсутствие запчастей связано с тем, что к началу нового века основные фирмы – производители, среди которых вновь единая (объединяющая хорошо известные фирмы «Opton» (ФРГ) и «Carl Zeiss, Jena» (ГДР)) «Carl Zeiss», осуществляют переход на новый технологический уровень разработок и изготовления современного парка металлографических микроскопов.

Обновленными и новыми из отечественных микроскопов являются – инвертированные микроскопы МИМ-10/10М, МЕТАМ РВ 21/22/23 и МЕТАМ ЛВ 31/32; из цейссовских – инвертированные микроскопы АХИОVERT 25СА и АХИОVERT 200МАТ; прямые микроскопы АХИОТЕСН 30/100, АХИОСОР 2МАТ, АХИОPLAN 2.

При большом многообразии предлагаемых сейчас на рынке микроскопов выбор наиболее подходящей под конкретные задачи модели и комплектации осуществляют, исходя из следующих рекомендаций.

Первое. Целесообразно обратить внимание на известность фирмы. Маленькие, малоизвестные фирмы, не имеющие достаточного опыта в разработке и производстве микроскопов, предлагают недорогие модели. Это, скорее всего, устаревшие модели микроскопов других фирм, снимаемые с производства.

Второе. Нужно обратить внимание на то, к какому поколению относится микроскоп. Сейчас наиболее современным является пятое поколение микроскопов. Стадия

переоснащения у разных фирм различная. Например, фирма «Лейка» до сих пор предлагает на отечественный рынок микроскопы 80-х годов серии MEF с экранной насадкой. В данном случае экранная насадка – это признак устаревшей конструкции, т. к. этот способ наблюдения (по разрешению и цветовому эффекту) не позволяет на современном уровне производить оценку качества материалов. Необходимо помнить, что прогресс не остановить и, купив сейчас устаревший микроскоп, через некоторое время можно остаться без комплектующих и запчастей. Кроме того, старые микроскопы были рассчитаны на длину тубуса «бесконечность», имели тубусную линзу с фокусным расстоянием 200-250 мм и хроматическую разность увеличения (ХРУ) порядка 2 %, что требовало применения компенсационных окуляров. Отсутствие компенсационных окуляров приводит к цветному повторению объекта по контуру изображения. Новое поколение микроскопов имеет уменьшенную тубусную систему с фокусным расстоянием около 160 мм с ХРУ = 0 %. Это позволяет уменьшить габаритные размеры микроскопа, а также упростить оптическую схему окуляра и улучшить его выходные параметры: расширить линейное поле окуляра до 25 мм, увеличить вынос выходного зрачка для возможности работать в очках. Например, современные цейссовские металлографические микроскопы соответствуют последнему поколению микроскопов и комплектуются ICS-оптикой (Infinity Color-Corrected System - оптическая система, скорректированная по хроматическим (цветным составляющим) абберациям). Иными словами, осветительная система, визуализирующая система (объектив) и визуальный канал рассчитаны таким образом, что вся система микроскопа не имеет хроматических искажений увеличения и положения. Это обеспечивает высокое разрешение микроскопа.

Третье – устойчивость штатива. Ушли в прошлое огромные по габаритам микроскопы, устанавливаемые на специальных столах с большим набором оптики, который еле мог разместиться в двух тумбочках. Основным девизом современности можно назвать компактность штатива с возможностью реализации всех методов исследования и документирования. Пожалуй, одним из наиболее устойчивых современных штативов признана дизайнерская разработка фирмы Carl Zeiss «Пирамида» – микроскопы серии «Axio», представитель которых изображен на рис. 2. Три опорные точки основания и геометрическая форма этого штатива создают так называемое «золотое сечение», которое, как известно, является наиболее устойчивым.

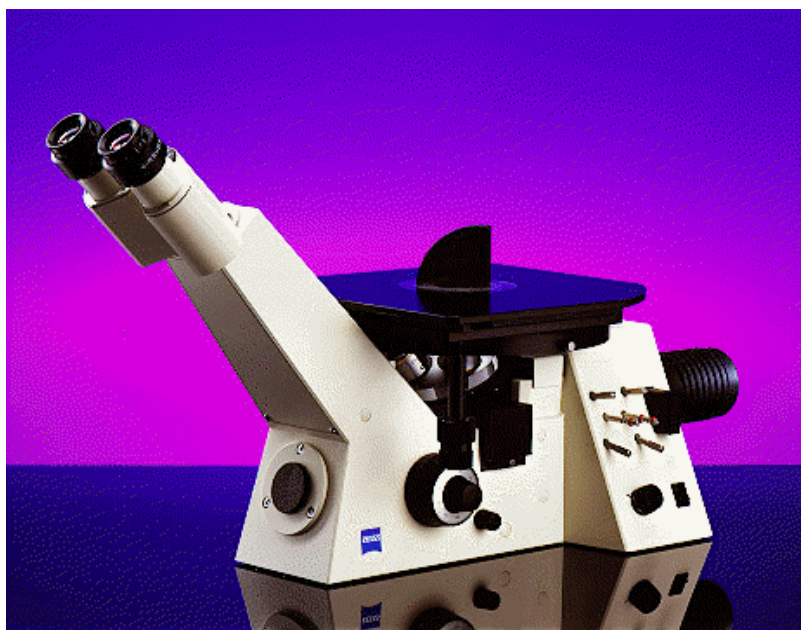


Рис. 2. Представитель микроскопов серии «Axio» ф. Carl Zeiss

Фирмы «Leica», «Nikon» и «Olympus» предлагают Ш-, Т-, Х- и Y- образные штативы, устойчивость которых достигается за счет увеличенных весогабаритных параметров конструкции.

Четвертое – эргономичность. Удобство управления, регулировки бинокулярной насадки по высоте, удобство управления координатным или вращающимся предметным столиком, а также удобство смены увеличения, методов исследования и проведение документирования. Все микроскопы должны комплектоваться средствами измерения – от окулярной сетки до цифрового окулярного микрометра.

Пятое – методы исследования. В металлографии используются следующие методы исследования световой микроскопии: светлое поле, темное поле, дифференциально-интерференционный контраст и поляризация. Рассмотрим, для чего нужен каждый из методов.

Светлое поле – наиболее распространенный метод исследования. Образцы рассматриваются в отраженном свете при прямом освещении объекта светом, проходящим через объектив. Метод предназначен для наблюдения тех компонентов, которые имеют естественную цветовую разность коэффициента отражения от большей части металла. Эта процедура используется для исследования интерметаллических соединений, графитовых или неметаллических включений и других мелких частиц, которые могут присутствовать в образце (например, нитриды, карбонитриды и бориды). Некоторые мелкие включения, имеющие по существу тот же коэффициент отражения, что и основной металл, могут наблюдаться в светлом поле, если они имеют большую разницу в контрастности и чистоте полировки, чем окружающий их металл.

Темное поле. Металловеды нечасто используют темнопольное освещение (освещение объекта с помощью эпизеркала, расположенного вокруг оптической части объек-

тива). Самосветящийся эффект, производимый темным полем, дает увеличение разрешения и видимости по сравнению со светлым полем. Темное поле собирает свет, который рассеян шероховатостью, трещинами, ямками, травлением или "канавками". Поэтому этот метод очень эффективен для изучения зернистых структур.

Не все фазы хорошо видны в темном поле. Например, в медных сплавах, таких как технически чистая медь, фаза окиси меди ярко светится в темном поле, однако медная сульфидная фаза не видна. При светлопольном освещении обе фазы смотрятся одинаково хорошо. Темное поле может открывать особенности микроструктуры, невидимые в светлопольном освещении. Они улучшают контрастность изображения многих микроструктур.

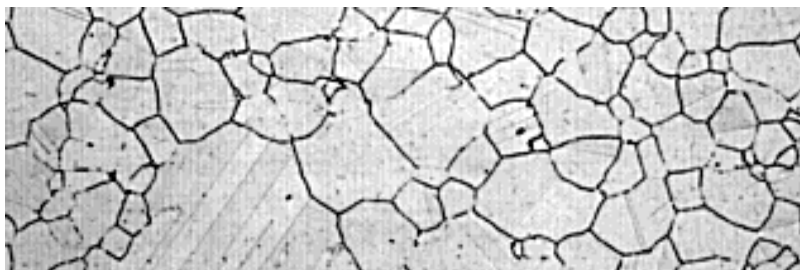
Дифференциально-интерференционный контраст. В последнее время этот довольно новый метод наблюдения привлекает все большее число металловедов. В поляризованном свете с помощью двигающейся перпендикулярно оптической оси микроскопа призмы Номарского, расположенной вблизи выходного зрачка микрообъектива, обнаруживаются различия по высоте, что создает псевдостереоэффект. Много лет назад подобный эффект можно было наблюдать при косом освещении, однако этот метод давал неравномерное освещение поперек поля и, как следствие, достаточно низкую разрешающую способность. Дифференциально-интерференционный контраст (ДИК) открывает такие особенности поверхности, которые невидимы в светлом поле, за счет улучшения контраста изображения и увеличения разрешающей способности.

Поляризованный свет. Некоторые металлы и сплавы, которые имеют некубическое кристаллическое строение атомов, хорошо исследуются при рассмотрении в скрещенных поляроидах (поляризационное направление поляризатора и анализатора составляет 90° в сторону создания зату-

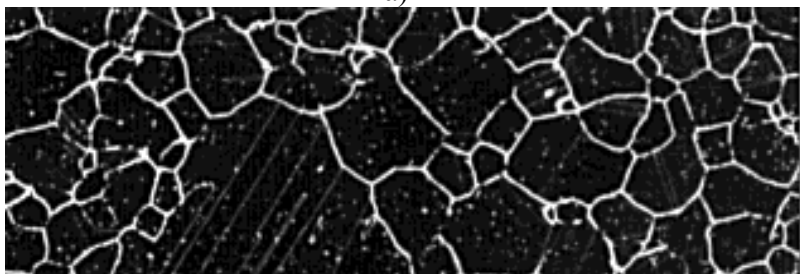
хания). Если в скрещенных поляроидах рассматривать металл или сплав с кубической кристаллической структурой (типа стали), то видимое поле равномерно темное, при этом не наблюдается никаких деталей микроструктуры. Однако если рассматривается полированный образец бериллия, кадмия, магния, титана, урана, цинка или циркония в скрещенных поляроидах, то микроструктура четко видна.

Линейно-поляризованный свет имеет ограниченное использование в металлографии, потому что многие металлы и сплавы имеют кубическую кристаллическую структуру. Однако некоторые вторичные фазы могут быть некубическими и хорошо реагировать на поляризованный свет. В частности, при использовании линейно-поляризованного света четко проявляется форма наростов шаровидного графита в чугунах. В некоторых случаях металлы с кубической кристаллической структурой могут исследоваться в линейно-поляризованном свете после травления. Оттенки образцов после травления часто рассматриваются с использованием светофильтров, устанавливаемых на пути света для увеличения цветовых эффектов.

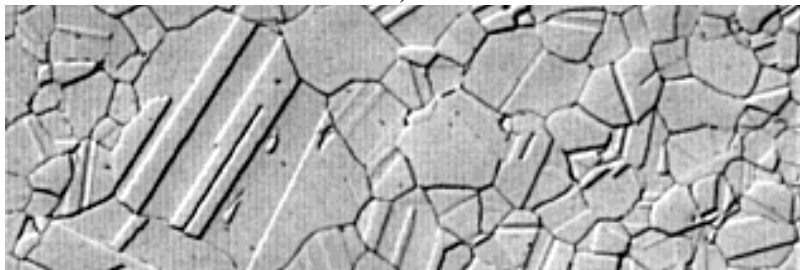
Сравнение возможностей различных методов получения оптического изображения на примере исследования аустенитной зернистой структуры сплава на основе никеля после травления представлено на рис.3. В режиме светлого поля (рис. 3а) частично видны развитая зернистая структура и некоторые слабые одинаковые отжиги (слабые параллельные линии или полосы в пределах зерна). В режиме темного (рис. 3б) поля контраст перевернут, но все зерна и двойные границы гораздо более четко проявлены. Так же видны некоторые грубые осадки в пределах зерна (мелкие частицы, белые точки). Режим ДИК хорошо открывает зернистую структуру.



а)



б)



в)

Рис. 3. Сравнение оптических изображений, полученных разными методиками: а) светлое поле, б) тёмное поле, в) ДИК

С появлением и внедрением в машиностроительные производства электронно-вычислительных машин стали развиваться компьютерные методы количественной металлографии. В настоящее время автоматические анализаторы изображения (АИИ) активно применяются в науке, металлургической промышленности и медицине. В машино-

строении, несмотря на то, что многими передовыми предприятиями уже приобретены различные ААИ, активного их применения не наблюдается. Не происходит этого по трём главным причинам. Первая причина заключается в том, что работа с ААИ требует использования микрошлифов высокого качества в массовом количестве, а их изготовление требует нового современного достаточно дорогостоящего отрезного, запрессовочного и шлифовально-полировального оборудования, на закупку которого у машиностроительных предприятий не хватает средств (к примеру, стоимость ААИ на порядок меньше стоимости любого из перечисленного оборудования). Вторая причина заключается в том, что для большинства применяемых в машиностроении материалов документально в виде различных стандартов или технических условий нормы установлены только на визуальную качественную оценку микроструктуры в виде различных шкал, таблиц и баллов. На методы и значения количественной оценки микроструктуры подавляющего большинства машиностроительных материалов нормативных документов просто не существует. И третья причина – низкая квалификация инженерного персонала лабораторий машиностроительных предприятий.

В то же время методы ААИ и фирмы-разработчики этих методов во всём мире активно развиваются. Наиболее известными разработчиками этих методов в нашей стране являются следующие фирмы:

- ф. «ВИДЕОТЕСТ», г. Санкт-Петербург,
- ф. «Новые Экспертные Системы», г. Москва
- ф. «SIAMS», г. Екатеринбург,
- ф. «Thixomet», г. Санкт-Петербург

Наличие разных производителей и разнообразие модификаций оборудования, инструментов и ААИ определя-

ют проблему выбора эффективной системы анализа изображения применительно к конкретным условиям производства. Системы анализа изображения – это многокомпонентные комплексы, и, выбирая систему, важно знать, которые из их составляющих являются необходимыми для решения ваших задач. При выборе руководствуются следующими принципами [4].

Первый и наиболее критический принцип: система является столь же хорошей, как ее самый слабый компонент. Часто установленные системы обладают неудовлетворительными характеристиками только потому, что неудовлетворительными характеристиками обладает всего лишь один элемент этой системы.

Второй принцип: система анализа изображения начинается с образца и с оборудования для подготовки образца. Если образец неинформативен или ненадлежащим образом подготовлен, то даже лучшая система произведёт неудовлетворительный анализ.

Третий принцип: система заканчивается отчетом. В отчете сосредоточен продукт, ради которого была создана лаборатория, и поэтому следует очень серьезно относиться к форме отчета, чтобы более качественно показать всю предшествующую ему работу.

Системы анализа изображения включают:

- микро- или макровозможности съемки изображения,
- камеру,
- устройство видеомонтажа,
- автоматический анализатор изображения.
- принтер твёрдой копии,

Многие предприятия хотели бы использовать оборудование, которое они уже имеют. Для большинства прикладных задач микроскопы и устройства для макросъемки,

которые должным образом поддерживались в течение эксплуатации, можно использовать при наличии чистой оптики, фотовыходов, достаточного освещения и возможности обеспечить требуемую фильтрацию.

Камера – критически важный системный компонент. Лучшими по разрешающей способности датчиками для световых изображений пока ещё остаются фотоплёнки и фотопластинки. Однако цифровые технологии, применяемые в фотокамерах, сегодня бурно развиваются и достигли очень высокого качества, постепенно вытесняя фотопленку.

Цифровая камера фиксирует изображения, отображает их на экране и затем повторяет сбор данных и показ изображения на дисплее снова и снова. Это называется "регенерацией". Ранние версии цифровых камер имели относительно большие времена регенерации. Типовое изображение быстро не могло быть перемещено по экрану, и камеры производили "эффект американских горок", поскольку изображения судорожно двигались. Чтобы преодолеть этот эффект, изготовители цифровых камер теперь обеспечивают сигнал предварительного просмотра видео или уменьшают время регенерации, так что "эффект американских горок" снижен. Новые камеры используют сигнал видео, чтобы найти и сосредоточиться на области интереса и затем зафиксировать изображение в цифровом режиме. Цифровая камера с высокой разрешающей способностью обычно создает изображение размером 1600x1200 пикселей и объемом более 5 мегабайт.

Отличительной особенностью видеокамер является то, что они создают постоянный поток видео, который может быть остановлен, когда поле, представляющее интерес, отображено на дисплее. Высококачественная видеокамера позволяет получить изображение размером обычно 800x500 пикселей и объемом приблизительно 1 мегабайт.

Существует три типа сигнала: композиционный (смешанный), S-видео (иногда называемый YC) и RGB. Композиционные камеры недороги и обычно используются для задач, в которых разрешающая способность некритична: типа наблюдения и конференц-связи. S-видео – это тип сигнала, применяемый для задач, где требуется более высокое разрешение. Изображения, произведенные от сигнала S-видео, вообще приемлемы в макроприложениях (задачах). Третий тип сигнала – RGB – видеосигнал самого высокого качества. RGB-семейство представлено камерами с одиночным чипом и с тремя чипами. Одиночные чипы обычно применяются для макроприкладных программ, в то время как камеры с тремя чипами рекомендуются для большинства прикладных программ микроскопа.

Взаимодействия между камерой, компьютерными аппаратными средствами и ААИ достаточно сложны, поэтому для их эффективного осуществления требуется высококачественная сетевая плата.

При выборе ААИ главным критерием служит требование по выполнению необходимых задач. Каждый пакет программ может иметь дополнительные «украшения» интерфейса, которые могут запутать пользователя. Примерный перечень общих функций и особенностей, которые необходимо оценивать при выборе ААИ, следующий:

- **Источник изображения:** может ли программное обеспечение импортировать, экспортировать и принимать массив информации от устройств ввода данных?
- **Вырезка, вставка, объединение:** имеется ли возможность монтажа изображений в других изображениях или в комбинации изображений?
- **Измерение:** может ли ААИ обеспечить инструментальную базу для сложных измерений?

- **Настройка изображения и анализ:** сможет ли программа улучшить изображения, могут ли быть проанализированы необходимые параметры: пористость, зерно, установлены их размеры и т.д.?
- **Видео в реальном масштабе времени и общее взаимодействие:** может ли система быть модернизирована, чтобы обеспечить "живую" конференц-связь между двумя или больше рабочими местами, насколько просто можно совместно использовать зафиксированные изображения?
- **Возможности презентации:** может ли программное обеспечение делать презентацию и просмотр или вы должны экспортировать все изображения в другую программу?
- **Генерация отчетов:** действительно ли генерация отчетов трудоемка или программное обеспечение упрощает этот процесс?
- **Архивирование и создание каталогов:** где изображения сохранены и как они находятся снова?
- **Работа с окнами:** сколько изображений могут быть просмотрены сразу и может ли окно с «живым» видео появляться при просмотре уже полученных изображений?
- **Блочность ПО:** действительно ли программное обеспечение – единый и неделимый продукт, или можно выбирать функции, которые необходимы, и приобретать только их?
- **Обучение и поддержка:** действительно ли вы один оцениваете и настраиваете программу или представители разработчиков обучат вас и обеспечат поддержку?
- **Обновления:** какова политика компании по обновлениям программного обеспечения, обновления

проводят бесплатно, за номинальную стоимость или вы должны покупать полный пакет?

Современное развитие чугунолитейного производства требует быстрого и качественного контроля микроструктуры чугуна, в частности определения формы, размеров и распределения графитовых включений. Стандартные методы контроля включений графита малопроизводительны и осуществляются визуально путем сравнения определяемого изображения шлифа со шкалами изображений ГОСТа [5]. Кроме того, что эти методы субъективны, в некоторых случаях классификация форм графитовых включений не охватывает всего многообразия форм графита и не позволяет получить достоверные зависимости: условия получения и обработки отливок → форма графита → свойства чугуна. Применение средств компьютерного анализа изображений позволяет расширить возможности контроля структуры и исследования как влияния на нее условий затвердевания отливок, так и влияния структуры на свойства чугуна.

В настоящее время в автоматических анализаторах изображения наиболее часто применяются следующие морфометрические параметры включений графита, которые наглядно можно увидеть на подготовленном для расчётов модельном изображении в виде чёрного каплеобразного объекта с порами на сером фоне, представленном на рис.4.

Диаметр Фере максимальный – максимальная протяженность объекта вдоль направления ориентировки $F1=A1B1$.

Диаметр Фере минимальный – максимальная протяженность объекта перпендикулярно направлению ориентировки $F2=A1D1$.

Диаметр Мартина максимальный – величина отрезка, проходящего через центр масс объекта (точку М) вдоль направления ориентировки

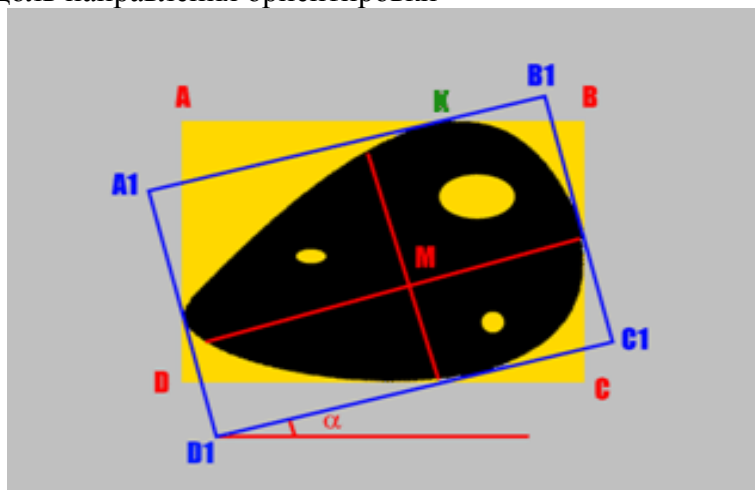


Рис. 4. Геометрические характеристики графитовых включений

Диаметр Мартина минимальный – величина отрезка, проходящего через центр масс объекта (точку М) перпендикулярно направлению ориентировки

Площадь графитового включения – площадь выделенного объекта.

Площадь графитовых включений – суммарная площадь всех выделенных объектов.

Кзап.региона – доля площади, занимаемой объектом, от площади региона ABCD.

Вытянутость – отношение максимального к минимальному диаметров Фере.

Фактор формы – отношение периметра объекта к корню квадратному из площади объекта $\Pi_{\phi} = F_s = P / \sqrt{S}$

Фактор формы – отношение периметра круга, равновеликого площади исследуемой фигуры, к периметру этой фигуры.: $F = 2\sqrt{\pi S} / P$

Фрактальная размерность [6] характеризует степень извилистости контура частицы.

Ключевым вопросом анализа надежности получаемых количественных результатов является оценка ошибки, её природы и статистических характеристик.

В современных системах компьютерного анализа и обработки изображения выделяют четыре основных этапа обработки:

- ввод изображения в компьютер (оцифровка);
- предварительная обработка, повышение качества изображения;
- сегментация изображения, выделение измеряемых объектов;
- измерение параметров выделенных объектов.

Первым источником ошибки при компьютерном анализе изображений является его оцифровка. Непрерывное изображение заменяется дискретным. Поле зрения разбивается на квадратные фрагменты (пиксели), величина яркости квантуется на конечное число градаций. Для видеокамер типичные размеры изображения $\sim 720 \times 540$ пикселей с глубиной яркости 256 градаций (до 65536) по каждой цветовой компоненте (R, G, B). Цифровые фотоаппараты позволяют вводить изображения гораздо большего размера ($\sim 2000 \times 1700$ пикселей), уменьшая, таким образом, ошибку дискретизации втрое.

Предварительная обработка имеет своей целью улучшить визуальные характеристики изображения, скомпенсировать шум видеокамеры и устройства оцифровки изображения, устранить неоднородности освещенности поля зрения, удалить мелкие помехи с изображения и т.п.

Главным источником неустраняемых систематических ошибок в анализе изображений является процедура сегментации. Во время её проведения возникают *ошибки интерпретации*, когда исследуемые объекты выделяются не полностью или неправильно, когда наряду с исследуемыми объектами выделяются артефакты и т.п. Эти ошибки могут устраняться только алгоритмически, с привлечением аппарата распознавания образов, эвристических алгоритмов реконструкции изображений и т.п. Для разработки таких алгоритмов большое значение имеет априорная информация, например, о форме частиц, о природе изображения («паркет» зерен) и т.д.

Во время проведения операций расчёта геометрических параметров формируются следующие погрешности.

Локальные параметры представляют собой характеристики размера, формы или ориентации объектов на изображении. Все многообразие локальных параметров строится на основе измерения базовых характеристик каждого объекта:

- площади;
- периметра;
- набора проекций (диаметры Фере);
- набора сечений, проходящих через центр тяжести (внешние и внутренние диаметры).

Для расчета базовых характеристик используется понятие внешнего контура частицы (рис. 5).

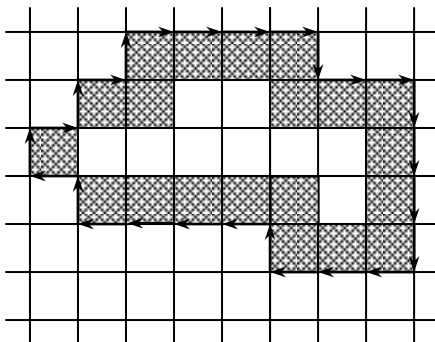


Рис. 5. Внешний контур частицы

Площадь рассчитывается как количество пикселей, ограниченных внешним контуром частицы. Абсолютная погрешность ее, очевидно, пропорциональна периметру.

Периметр частицы рассчитывается как длина ломаной, соединяющей центры смежных сегментов контура. Чем меньше изображение объекта, тем больше возникающая погрешность в измерении периметра. Так, например, для объекта размером несколько пикселей, представленном на рис.6, периметр выпуклой частицы заменяется периметром описанного шестиугольника.

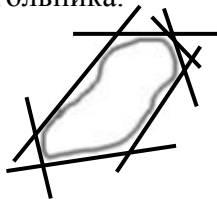


Рис. 6. К расчету периметра частицы

При вычислении диаметров Фере, а также внутренних и внешних диаметров, используется внешний контур частицы, что дает, очевидно, значение ошибки дискретизации для этих параметров в один пиксел с каждой стороны (равномерно распределенная случайная величина на интервале $[0,1]$). Строго говоря, величина этой ошибки зависит от направления и может достигать значения $\sqrt{2}$ для угла в 45° . Такую же погрешность имеют максимальный, минимальный и ортогональный максимальному диаметры. Средние диаметры по 64 направлениям имеют уже, очевидно, нормально распределенную погрешность с уменьшенным в 8 раз значением среднеквадратичного отклонения (СКО).

При построении распределения параметров частиц следует учитывать краевые эффекты.

Часть измеряемых объектов при осуществлении операций расчёта параметров не единичного, а всех типовых объектов, пересекает границу изображения, т.е. видна не полностью. Попытка измерить их параметры приводит к искажению гистограммы: они попадают не в свой класс, поэтому их необходимо отбрасывать. Долю отбрасываемых объектов можно в среднем оценить следующим образом. Рассмотрим прямоугольник со сторонами, параллельными границе изображения, описанный вокруг частицы (длины его сторон равны горизонтальной и вертикальной проекциям частицы). Все частицы, имеющие объемлющий прямоугольник такого размера (dX , dY), пересекают границу изображения с вероятностью

$$p(dx, dy) = 1 - \frac{(sX - dX)(sY - dY)}{(sX + dX)(sY + dY)}, \quad (1)$$

где sX , sY – размеры изображения (рис. 7).

Формула (1) позволяет оценить в среднем долю отбрасываемых частиц для каждого размерного класса (dX , dY). Далее, при построении гистограммы распределения любого параметра можно при добавлении частицы в тот или иной класс инкрементировать (увеличить) счетчик столбца гистограммы не на 1, а на $\frac{1}{1 - p(dX, dY)}$.

Описанный прием позволяет построить несмещённую оценку функции распределения того или иного параметра объектов на изображении.

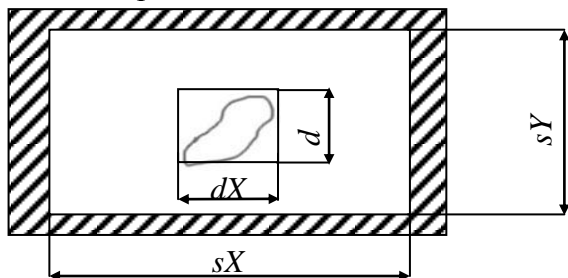


Рис. 7. Расчет вероятности пересечения границ изображения частицей

Рассмотренные выше источники погрешностей при измерении параметров изображения микроструктуры материалов являются, вообще говоря, неустранимыми. Для получения более достоверных оценок измеряемых параметров обычно применяется обработка серии изображений.

Во многих задачах анализа изображений необходимо преобразовать исходное изображение таким образом, чтобы выделить на нём характерные особенности [7,8]. В случае, когда интересующие исследователя детали отличаются от второстепенных по форме и/или размеру, возможно использование ряда морфологических операций. К основным морфологическим операциям относятся:

- дилатация;
- эрозия;
- открытие;
- закрытие;
- операции морфологических градиентов;
- связная и топологическая скелетизации;
- эрозионное и гранулометрическое преобразования;
- выделение хребтов, долин, пиков, провалов интенсивности.

Для бинарных изображений действие операции *дилатации* заключается в следующем. В каждую белую точку исходного бинарного изображения (рис. 8,а) следует поместить центр шаблона и закрасить белым все точки, накрытые шаблоном (рис. 8,б). Для полутоновых изображений действие дилатации приводит к тому, что значение в каждой точке заменяется на максимальное значение из точек, накрытых шаблоном с центром в данной точке.

Действие операции *эрозии* противоположно действию дилатации. Для бинарных изображений шаблон следует размещать в черных точках, для полутоновых – значение

в каждой точке заменяется на минимум по шаблону (рис. 8,в).

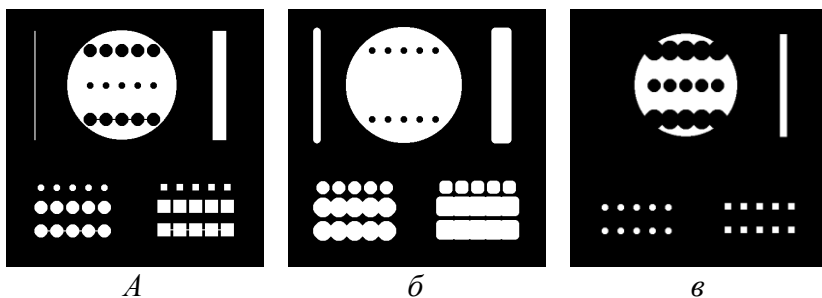


Рис. 8. Простейшие морфологические операции: а - исходное бинарное изображение; б - результат выполнения операции «дилатация»; в - результат выполнения операции «эрозия»

Открытие изображения заключается в последовательном применении эрозии и дилатации на один и тот же шаблон. Таким образом, с изображения исчезают объекты, “съеденные” эрозией, остальные объекты восстанавливают свою форму с точностью до формы шаблона (рис. 9).

Заккрытие противоположно открытию и заключается в последовательном применении дилатации и эрозии. Тем самым все, что относилось к объектам для открытия, относится для закрытия к порам, фону и т.п. (см. рис. 9).

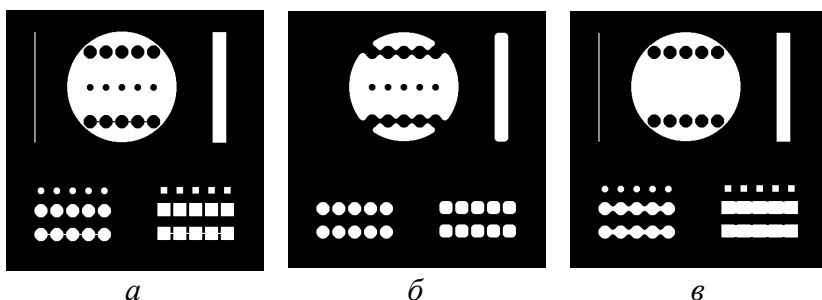


Рис. 9. Морфологические операции «открытие» и «заккрытие»: а - исходное бинарное изображение; б - ре-

зультат выполнения операции «открытие»; в - результат выполнения операции «заккрытие»

Операции морфологических градиентов вычисляют величины различных перепадов в пределах апертуры шаблона. Пусть I , H , L – значения текущей, максимальной и минимальной интенсивности в пределах апертуры шаблона для каждой точки изображения. Тогда градиенты интенсивности можно определить следующим образом:

- внутренний: $I - L$,
- внешний: $H - I$,
- слабый: $\min(H - I, I - L)$,
- сильный: $\max(H - I, I - L)$,
- градиент Бойхера: $H - I$.

Операции градиентов позволяют выделять границы яркости на изображении (рис. 10).

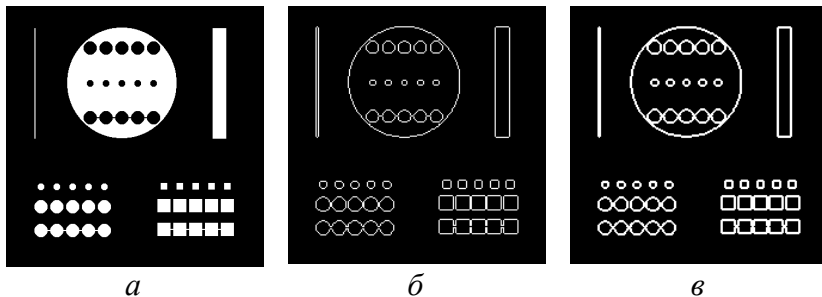


Рис. 10. Операции морфологических градиентов: а - исходное изображение; б - результат выполнения операции «внешний градиент интенсивности»; в - результат выполнения операции «градиент Бойхера»

Операция **связной скелетизации** приводит к последовательному “утонению” всех линий на изображении, так что они становятся толщиной в один пиксель. Компактные частицы при таком преобразовании превращаются

в “скелет” толщиной в один пиксель (рис. 11). Линии и частицы на изображении не разрываются, так что количество частиц в результирующем изображении в точности совпадает с исходным.

Топологическая скелетизация, так же как и связная скелетизация, производит “утонышение” линий, но сохраняет лишь топологию объектов. Сплошные частицы и линии стягиваются в точки, а пористые структуры превращаются в “соты” из линий толщиной в один пиксель (см. рис. 11).

Результатом **гранулометрического преобразования** является полутоновое изображение, отображающее размеры частиц (рис. 12). Размер измеряется в “шаблонах”, т.е. частица имеет размер N , если она исчезает с изображения при открытии на шаблон, увеличенный в N раз. При этом в результирующем изображении во всех точках, соответствующих этой частице будет содержаться значение N .

Результатом **эрозионного преобразования** является полутоновое изображение, отображающее “глубину” частиц, т.е. значение полутонового изображения в точке частицы равняется расстоянию от этой точки до ближайшей к ней границы частицы (см. рис. 12). Расстояние, как и в гранулометрическом преобразовании, измеряется в “шаблонах”.

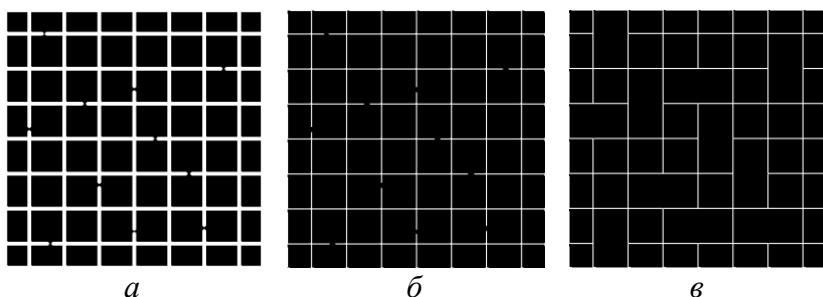


Рис. 11. Операции скелетизации: а - исходное бинарное изображение; б - результат выполнения операции

«связная скелетизация»; в- результат выполнения операции «топологическая скелетизация»

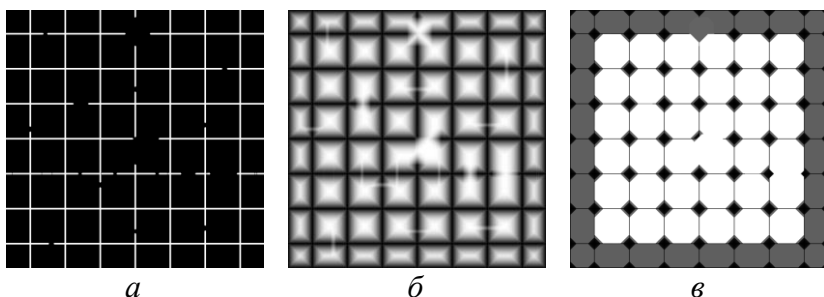


Рис. 12. Операции эрозионного и гранулометрического преобразований: а - исходное бинарное изображение; б - результат выполнения операции «эрозионное преобразование»; в - результат выполнения операции «гранулометрическое преобразование»

Следующие операции производят выделение структурных элементов изображения, таких как “пики”, “провалы”, “хребты” и “долины” яркости. Величина проявляемых особенностей зависит от размера шаблона операции.

Выделение хребтов и долин интенсивности сводится к арифметическому вычитанию открытия из исходного изображения или исходного изображения из его закрытия (рис. 13).

Выделение пиков и провалов интенсивности сводится к арифметическому вычитанию выметания из исходного изображения или исходного изображения из его заполнения (см. рис.13)

Используя дилатацию, эрозию, открытие и закрытие на шаблоны различных формы и размеров, применяя к результатам различные поэлементные операции, можно сконструировать новые морфологические операции, которые позволяют подавить на изображении импульсные помехи, выровнять освещенность и улучшить контрастность,

подчеркнуть границы или мелкие детали и решить ряд других задач. Например, открытие на круг (множество внутренних целых точек круга) удаляет с изображения яркие детали и выступы по краям объектов размером меньше диаметра круга.

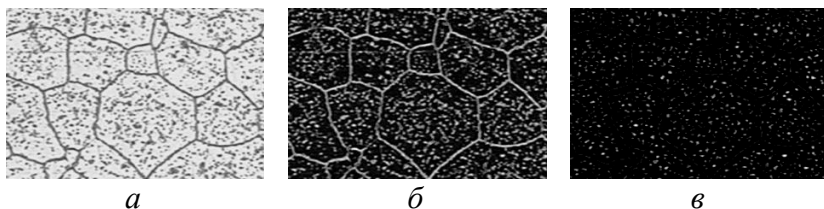


Рис. 13. Операции выделения деталей структуры по яркости:

а - исходное изображение с характерными долинами (межзёрные границы) и провалами (внутренняя структура зерна) интенсивности; б - результат выполнения операции «выделение долин интенсивности»; в - результат выполнения операции «выделение провалов интенсивности»

Для **контрастирования** изображения используется информация о распределении яркости пикселей на исходном оцифрованном изображении (рис. 14,а). Если изображение имеет узкий диапазон яркостей пикселей, то операция контрастирования равномерно “растягивает” этот диапазон так, чтобы он получил максимально возможную ширину (рис. 14,б).

Очень часто из-за наличия шумовых помех операция контрастирования не даёт желаемого эффекта. В случаях, когда необходимо подчеркнуть темные или светлые объекты (то есть, сделать их одинаково тёмными или одинаково светлыми), возможно применение операции **существенного контрастирования** (рис. 14,в). Данная операция заключается в следующем. Вычисляются два значения яркости (l_1 и l_2), такие, что площади под графиком распределения

яркости слева от l_1 и справа от l_2 равны и составляют K % от общей площади. Затем пиксели, яркость которых меньше чем l_1 , устанавливаются максимально тёмными, а пиксели, яркость которых больше чем l_2 , – максимально светлыми. Для пикселей со значением яркости из диапазона (l_1, l_2) выполняется операция обыкновенного контрастирования.

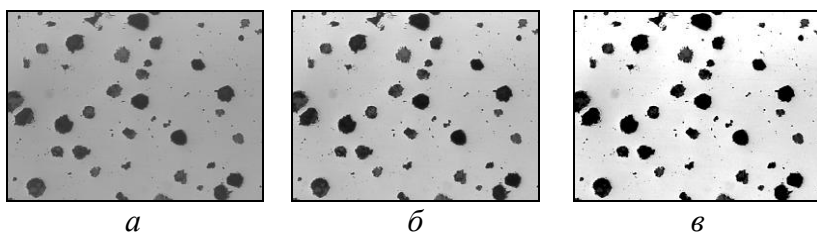


Рис. 14. Операции контрастирования: а - исходное изображение включений шаровидного графита в чугуне; б - результат выполнения операции «контрастирование»; в - результат выполнения операции «существенное контрастирование» со значением процентиля 6 %

Для устранения неоднородности освещенности изображения применяют операции, которые представляют собой варианты фильтрации пространственных низких частот. Так, на изображении устраняют плавные крупномасштабные изменения яркости. Существует большое количество классов изображений с уникальными яркостными и морфологическими характеристиками, поэтому для конкретного класса изображений следует экспериментально подбирать по наилучшему результату подходящий фильтр. Управляющим параметром этих операций является прямоугольный шаблон большого размера, который определяется характерным размером неоднородности. Широко используются следующие фильтры (рис. 15):

Арифметический фильтр Лапласа: разность между исходным и “сглаженным” (усредненным) по шаблону изображением.

Полосовой фильтр Лапласа: для шаблона размера $m \times n$ применяют последовательно два арифметических фильтра Лапласа для шаблонов $m \times 1$ и $1 \times n$.

Морфологический фильтр Лапласа: для каждой точки исходного изображения из значения яркости этой точки вычитается полусумма минимума и максимума распределения яркости по апертуре шаблона.

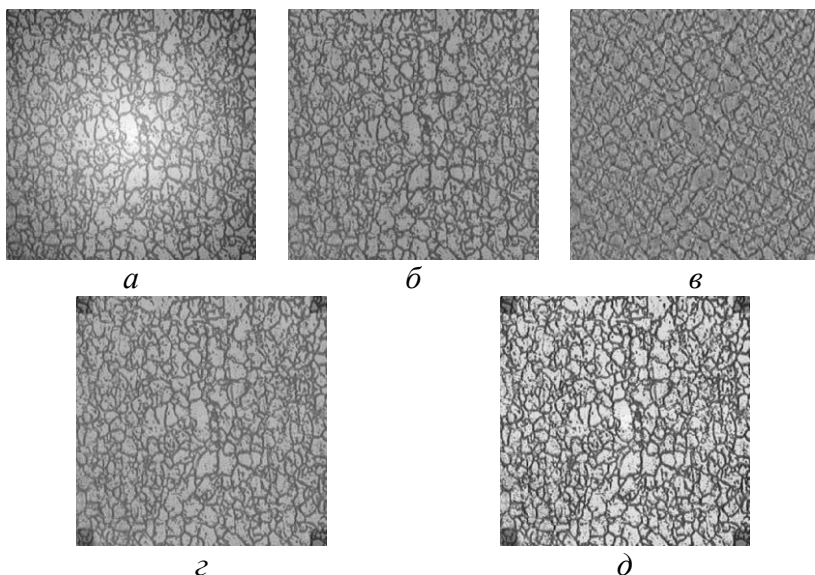


Рис. 15. Операции устранения неравномерности освещённости:

а - исходное изображение; б - результат выполнения операции «арифметический фильтр Лапласа»; в - результат выполнения операции «полосовой фильтр Лапласа»; г - результат выполнения операции «морфологический фильтр Лапласа»; д - результат выполнения операции «локальное контрастирование»

Локальное контрастирование: контрастирование по апертуре шаблона.

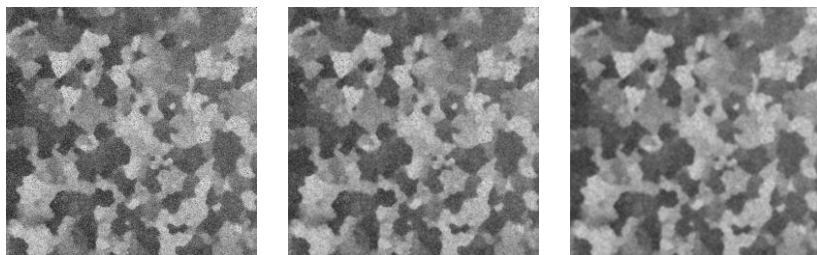
Изображение может содержать различные помехи:

- аддитивные (“шум” устройства оцифровки изображения);
- импульсные (пыль в оптическом тракте микроскопа и устройства ввода изображения, дефекты пробоподготовки).

Для удаления аддитивных помех на изображении используют операции “сглаживания” (усреднения по апертуре) и свёртки (рис. 16):

Фильтры низких частот 1-го, 2-го и 3-го рода: свертки изображения с весовой маской размера 3×3. Значения весов фильтров приведены ниже.

Фильтр 1-го рода	Фильтр 2-го рода	Фильтр 3-го рода
1 1 1	1 1 1	1 2 1
1 1 1	1 2 1	2 4 2
1 1 1	1 1 1	1 2 1



a

б

в

Рис. 16. Операции удаления аддитивных помех на изображении:

- а - исходное изображение зёрненной структуры алюминия;
- б - результат выполнения операции «фильтр НЧ 3-го рода»;
- в - результат выполнения операции «фильтр НЧ 1-го рода».

- результат выполнения операции «равномерное сглаживание» на шаблон 5x5

Равномерное сглаживание изображения: среднее арифметическое по апертуре шаблона. Таким образом, сглаживание происходит с единичным весом по шаблону любой формы и размера. Степень сглаживания зависит от размеров шаблона.

Для удаления импульсных помех используют следующие операции.

Операции **морфологического открытия** и **закрытия** изображения предназначены для устранения малых объектов (“пятен” или “полос”), которые в поперечнике не превосходят размеров шаблона. Для бинарных изображений операция «открытие» удаляет частицы, «закрытие» – поры, для полутоновых – соответственно светлые и темные объекты (рис. 17,а,б).

Операции **выметания положительных шумов** и **заполнения отрицательных шумов** в отличие от открытия и закрытия удаляют только те объекты, которые могут целиком “уместиться” на теле шаблона (рис. 17,в).

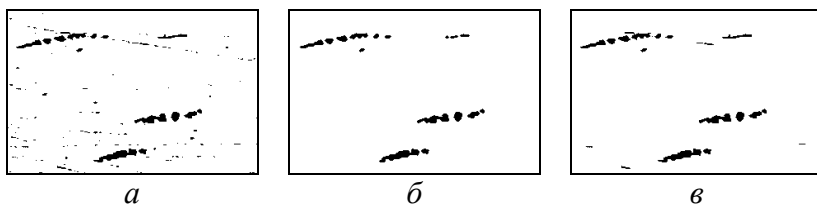


Рис. 17. Операции удаления импульсных помех на изображении:

а - исходное бинарное изображение включений сульфидов в стали; помимо сульфидов наблюдаются также царапины и остатки полировальной пасты; б - результат выполнения операции «закрытие» на шаблон 3x3; в - результат выпол-

нения операции «заполнение отрицательных шумов» на шаблон 5x5

Операция *заливки пор* используется для заполнения внутренних пор на частицах (рис. 18).

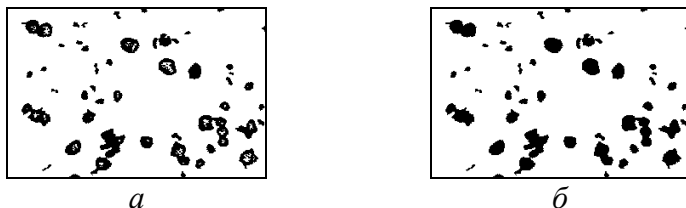


Рис. 18. Операция заливки пор на изображении:
а - исходное бинарное изображение поперечного сечения силицидов в латуни; б - результат выполнения операции «заливка пор»

Операция *фильтра мелких частиц* используется для удаления с изображения мелких включений (рис. 19). Параметром операции служит пороговое значение площади, такое, что с исходного изображения будут удалены все частицы, имеющие меньшую площадь.

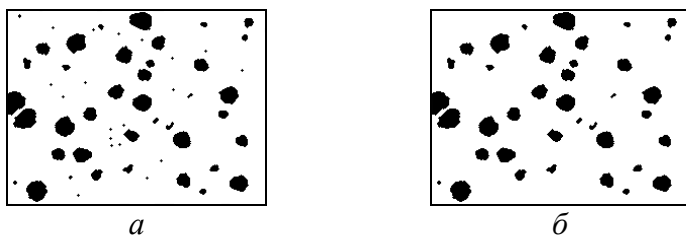


Рис. 19. Операция удаления мелких частиц на изображении:
а - исходное бинарное изображение включений шаровидного графита в чугуна. На изображении присутствуют посторонние включения ("шум"); б - результат выполнения операции «фильтр мелких частиц»

Использование методов улучшения качества изображений позволяет:

- повысить "восприимчивость" изображения как на экране компьютера, так и при его распечатке;
- исключить из изображения помехи, препятствующие объективному анализу изображений.

Одной из неразрешимых в рамках традиционной количественной металлографии задач является проблема пограничных объектов, которые расположены на краю поля зрения. Поскольку часть площади таких объектов расположена вне видимого в окуляры или захваченного камерой поля зрения, то оценить метрические характеристики таких объектов невозможно. Исключение из анализа пограничных объектов приводит к значительным проблемам воспроизводимости результатов измерений от поля к полю. Существуют стереологические методы учета пограничных объектов для минимизации или устранения системной ошибки, связанной со вкладом пограничных объектов (методы Джефриса, Салтыкова, Гандерсена), однако они относятся только к измерениям среднего числа объектов на единицу площади и не разрешают проблемы оценки метрических параметров таких объектов структуры. Другой такого же рода проблемой является невозможность в рамках традиционной металлографии наблюдать в микроскоп обширную площадь поля зрения, но с высоким разрешением.

Обе эти задачи, как правило, решаются созданием алгоритма склеивания смежных полей зрения «на лету»: пока предметный столик микроскопа перемещается на очередное смежное поле зрения, предыдущее поле прецизионно «пиксель в пиксель» стыкуется к полю, захваченному накануне. Итак, поле за полем формируется панорама размером в несколько десятков или сотен полей зрения и разрешением несколько десятков мега пикселей, при этом

удельная площадь пограничных объектов сокращается в сотни раз, а воспроизводимость результатов измерений возрастает многократно.

5. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Работа рассчитана на 12 часов

1. Последовательность реализуемых этапов:

1.1. Теоретико-методологический анализ исследуемой области – 0,5 часа.

1.2. Ознакомление с демонстрационными версиями автоматических анализаторов изображения (ААИ) ImageExpert Pro 3 и ImageExpertSample 2 – 3,5 часа.

1.3. Подготовка микрошлифов образцов (заливка, выравнивание, шлифовка, полировка) – 2 часа.

1.4. Исследование микрошлифов с помощью оптического микроскопа, получение цифрового изображения микроструктуры – 2 часа.

1.5. Обработка изображения с помощью цифровых фильтров ААИ ImageExpert Pro 3, получение цифрового модельного изображения (ЦМИ) включений графита и расчёт количественных характеристик включений графита – 2,5 часа.

1.6. Оценка характеристик графита с помощью ААИ ImageExpertSample 2 – 0,5 часа.

1.7. Сравнительный анализ методов количественной оценки характеристик микроструктуры графита с помощью ААИ ImageExpert Pro 3 и ImageExpertSample 2 – 0,5 час.

1.8. Составление отчёта – 0,5 часа.

2. Указания к выполнению работы

Перед началом экспериментальной работы в качестве персонального задания преподавателю выдать студентам (слушателям) индивидуальные образцы чугунов. После проведения теоретико-методологического анализа области металлографического анализа графитизированных чугунов,

студентам приступить к изготовлению микрошлифов. Для этого подготовить эпоксидный клей, смешав эпоксидную смолу и отвердитель в соотношении 10:1 и тщательно перемешав. Поместить чугунный образец исследуемой поверхностью вниз внутрь оправки, находящейся на бумажной подложке. Залить аккуратно клей на образец до верхнего уровня оправки. Выдержать время полимеризации смолы не менее 24 часов.

После заливки образцов студентам ознакомиться с демонстрационной версией ААИ ImageExpert Pro 3 и ImageExpertSample 2. При этом особое внимание следует обратить на инструменты программ, позволяющие осуществлять различные виды коррекции цифрового изображения, цифровой фильтрации изображения, а также возможности методов определять количественные параметры отдельных элементов микроструктуры и статистические характеристики определения случайных величин количественных параметров множеств элементов микроструктуры.

Автотоновая коррекция позволяет изменять палитру изображения с помощью линейного, нелинейных и вероятностных методов преобразования. Метод преобразования интенсивностей цветов оператор выбирает из предложенного списка. Автотоновая коррекция, по существу, предлагает набор изначально предустановленных форм кривых преобразования из тональной коррекции. Форма кривых преобразования определяется наиболее популярными и действенными математическими и статистическими законами.

Порядок действий:

1. Выберите команду **Автотоновая коррекция** в меню **Коррекция** или нажмите кнопку **Автоматическая коррекция палитры изображения** на панели коррекции изображений для вызова диалогового окна **Коррекция гистограммы**.

2. Выберите метод преобразования гистограммы интенсивностей цветов.

3. Для сохранения результата автотоновой коррекции и последующего закрытия окна **Коррекция гистограммы** нажмите кнопку **Применить**.

4. Для закрытия окна **Коррекция гистограммы** без проведения автотоновой коррекции нажмите кнопку **Отмена**.

Тональная коррекция позволяет настраивать яркость, контрастность и баланс цветов изображения как для всех цветовых составляющих, так и для каждой цветовой компоненты в отдельности. Вид кривой преобразования оператор настраивает вручную.

Тональную коррекцию используют для подчёркивания или подавления отдельных цветовых составляющих на изображении, для усиления контрастности, изменения гаммы цветов изображения.

Порядок действий:

1. Выберите команду **Тональная коррекция** в меню **Коррекция** или нажмите кнопку **Яркость, контраст, баланс цветов** на панели коррекции изображений для вызова диалогового окна **Тональная коррекция**.

2. Укажите составляющую цвета, для которой необходимо провести тональную коррекцию, выбрав одну из кнопок:

Коррекция всех составляющих цвета

Коррекция красной составляющей цвета

Коррекция зелёной составляющей цвета

Коррекция синей составляющей цвета

3. Определите оптимальный вид кривых яркости, контрастности и баланса цветов, перемещая движки по соответствующим шкалам:

Коррекция яркости

Коррекция контрастности

Коррекция баланса цветов

Числа у шкал обозначают текущее положение движков.

4. Для сохранения результата тональной коррекции и последующего закрытия окна ***Тональная коррекция*** нажмите кнопку ***Применить***.

5. Для закрытия окна ***Тональная коррекция*** без проведения тональной коррекции нажмите кнопку ***Отмена***.

Нижняя кромка гистограммы показывает спектр оттенков цвета от 0-чёрного (слева) до 255-белого (справа). Доля точек каждого цвета на изображении отображается в виде вертикального отрезка пропорциональной высоты, образуя гистограмму распределения цветов-оттенков.

Красная линия отражает отсутствие изменений при проецировании значений цвета с нижнего исходного положения на новую вертикальную позицию слева. Чёрная кривая преобразования задаёт характер изменения цветовых оттенков, поскольку значения с нижней кромки диаграммы при отражении от кривой попадают в другие области значений на вертикали слева.

При изучении остальных инструментов применять аналогичный порядок действий.

Бинаризация изображения заключается в преобразовании полноцветного изображения в чёрно-белое. Все точки, значения, интенсивности которых превышают уровень бинаризации, установленный оператором, окрашиваются белым, остальные – чёрным.

Бинаризацию изображения обычно проводят для выделения цветом интересующих объектов с целью их количественного анализа. Операции Бинаризации изображения обычно предшествует предварительная обработка с использованием цифровых фильтров, что позволяет получать лучшие результаты распознавания объектов на изображении.

Примечание. В большинстве случаев для выделения структурных составляющих более предпочтительной является операция Сегментация по цвету (более подробно – см. ниже по тексту), поскольку обеспечивает видимость области фона в процессе настройки, что в конечном итоге поднимает точность выделения объектов.

Представление изображения в **заданной палитре** может быть выполнено с помощью одного или нескольких следующих преобразований:

- перевод палитры в оттенки одной составляющей цвета палитры RGB.
- перевод палитры в оттенки серого.
- инвертирование палитры.

Преобразование изображений в палитру оттенков серого, в первую очередь, упрощает проведение последующих этапов анализа, так как позволяет анализировать только яркостный канал, а не все три цветовых канала одновременно. Кроме того, преобразование палитры может снизить уровень шумов на изображении и привести к лучшим результатам распознавания объектов при последующей бинаризации или сегментации по цвету. Дело в том, что основная часть электронных шумов камеры обычно располагается в области синего спектра цвета, а в области красного спектра камеры имеют избыточную чувствительность и слабую контрастность. Поэтому в случае, если цветовая информация не является предметом исследования, целесообразно из полного цветового спектра выделять зелёный диапазон с переводом его в оттенки серого.

Принцип работы

Любой цвет на изображении определен в палитре RGB как $C = (R, G, B)$,

где C – цвет,

R – интенсивность красной составляющей цвета,

G – интенсивность зелёной составляющей цвета,

V – интенсивность синей составляющей цвета.

Перевод изображения в оттенки красного осуществляется подавлением зелёной и синей составляющей палитры при неизменной красной составляющей.

$C = (R, G, B)$ преобразуется в $CR = (R, 0, 0)$,
где CR – оттенок красного.

Перевод изображения в оттенки зелёного осуществляется подавлением красной и синей составляющей палитры при неизменной зелёной составляющей.

$C = (R, G, B)$ преобразуется в $CG = (0, G, 0)$
где CG – оттенок зелёного.

Перевод изображения в оттенки синего осуществляется подавлением красной и зелёной составляющей палитры при неизменной синей составляющей.

$C = (R, G, B)$ преобразуется в $CB = (0, 0, B)$
где CB – оттенок синего.

Представление изображения в оттенках серого подразумевает перевод в усреднённое значение каждой составляющей цвета.

$C = (R, G, B)$ преобразуется в $C = (K, K, K)$,
где $K = 1/3 \times (R+G+B)$.

Коррекция белого цвета позволяет требуемый активный цвет на изображении привести к уровню белого. Остальные цвета изображения изменяются путём увеличения интенсивности их цветовых составляющих на аналогичные величины.

Принцип работы

Любой цвет на изображении определён в палитре RGB как $C = (R, G, B)$,

где C – цвет,

R – интенсивность красной составляющей цвета,

G – интенсивность зелёной составляющей цвета,

B – интенсивность синей составляющей цвета.

Максимальная интенсивность всех составляющих (255 единиц) соответствует белому цвету.

Инструмент преобразует цвет, соответствующий активному цвету, в белый:

$C1 = (r1, g1, b1)$ преобразуется в $C1^* = (255, 255, 255)$, где $C1$ – цвет на исходном изображении, соответствующий активному цвету,

$C1^*$ – белый цвет,

$r1$ – интенсивность красной составляющей цвета $C1$,

$g1$ – интенсивность зелёной составляющей цвета $C1$,

$b1$ – интенсивность синей составляющей цвета $C1$.

Остальные цвета изменяются путем увеличения интенсивностей их составляющих на аналогичные величины

$C2 = (r2, g2, b2)$ преобразуется в $C2^* = (r2+255-r1, g2+255-g1, b2+255-b1)$,

где $C2$ – цвет на исходном изображении,

$C2^*$ – преобразованный цвет,

$r2$ – интенсивность красной составляющей цвета $C2$,

$g2$ – интенсивность зелёной составляющей цвета $C2$,

$b2$ – интенсивность синей составляющей цвета $C2$.

Баланс цветов позволяет изменять интенсивности красной, зелёной и синей составляющих палитры. Это даёт возможность более чётко выделить элементы структуры определённого оттенка, а также частично подавить оттенки нежелательных объектов, улучшая результат последующих преобразований при бинаризации или сегментации по цвету.

Инструмент **Преобразование псевдоцветов** изменяет палитру изображения путём умножения интенсивностей цветов на матрицу преобразования, задаваемую оператором.

Принцип работы

Любой цвет на изображении определен в палитре RGB как $C = (R, G, B)$,

где C – цвет,
 R – интенсивность красной составляющей цвета,
 G – интенсивность зелёной составляющей цвета,
 B – интенсивность синей составляющей цвета.

Инструмент преобразует цвета путём умножения интенсивностей красной, зелёной и синей составляющих палитры на матрицу преобразования.

Цифровая фильтрация предоставляет широкие возможности по преобразованию изображений на всех стадиях подготовки к количественному анализу. Весь набор фильтров распределён по разделам в соответствии с их функциональным назначением и математическим обеспечением.

Качественные фильтры служат для сглаживания шумов, дефектов и нежелательных структурных составляющих на исходных/полноцветных изображениях. Исключением является пиктоновый фильтр, который целесообразно применять для сегментированных изображений.

Высокочастотный фильтр служит для подавления на изображениях высокочастотного сигнала, выраженного наличием электронных шумов и девиацией интенсивности отражённого света. Высокочастотный фильтр вносит наименьшие искажения в изображение, поэтому его применение часто недостаточно для подавления всех шумов.

Низкочастотный фильтр предназначен для подавления на изображениях низкочастотных шумов. В результате применения низкочастотного фильтра изображение выглядит слегка размытым.

Медианный фильтр предназначен для сглаживания шумов и тонких дефектов (например, царапин) на полноцветном изображении. В результате применения медианного фильтра, на изображении в достаточной мере сглаживаются мешающие шумы, но в то же время, сохраняются чёт-

кими границы, что важно при последующем выделении объектов.

Пороговый фильтр реализует пространственное сглаживание интенсивностей точек изображения. Особенностью фильтра является возможность фильтрации только тех структурных элементов, яркость которых превышает средний уровень на величину порога.

Пиктоновый фильтр реализует вероятностно-статистический принцип преобразования изображений. Его обычно применяют для сегментированных или бинаризованных изображений.

Спектральные фильтры предназначены для коррекции исходных изображений посредством воздействия на спектр оттенков изображения

Нерезкое маскирование - способ мягкого усиления границ объектов с учётом разности исходной и сглаженной функции.

Стат. дифференцирование является способом усиления границ с учётом статистических и дифференциальных характеристик изображения.

Фильтр Уолиса, являясь модифицированным методом статистического дифференцирования, предназначен для выявления мелких структурных составляющих, таких например, как *границы зёрен*.

Фильтр Собель предназначен для контрастирования перепадов интенсивности.

Фурье – степенной фильтр предназначен для усиления границ за счёт извлечения корня из частотно-амплитудных характеристик изображения в обратном Фурье-пространстве. Фильтр даёт очень сильный эффект за счёт резкого подавления сильных гармоник и резкого усиления слабых деталей.

Фильтр Кенстр предназначен для усиление границ с учётом логарифма частотно-амплитудных характеристик изображения.

Фильтр Градиент позволяет устранить дефект освещённости в виде равномерной боковой засветки.

Фильтр Макронеоднородность устраняет дефекты освещённости сложной, нелинейной конфигурации.

Морфологические фильтры используются для обработки подготовленных сегментированных изображений с целью автоматического исправления морфологии элементов изображения. Морфологические фильтры работают с активным цветом. В качестве предварительной подготовки необходима сегментация по цвету или бинаризация.

Фильтр Эрозия позволяет равномерно расширить области фонового цвета на заданный радиус.

Фильтр Дилатация позволяет равномерно расширить области активного цвета на заданный радиус.

Фильтр Вскрытие является комбинацией фильтров Эрозия и Дилатация, применяемых последовательно. Действие фильтра проявляется в разделении слившихся объектов, если толщина их перетяжек меньше значения установленного радиуса.

Фильтр Замыкание является комбинацией фильтров Дилатация и Эрозия, применяемых последовательно. Действие фильтра проявляется в соединении разрывов элементов структуры, не превышающих значение установленного радиуса.

Фильтр Разделение позволяет разделять объекты, если ширина перешейка не превышает значение установленного радиуса.

Фильтр Соединение позволяет соединять разорванные участки границ зёрен.

Фильтр Скелетизация позволяет сократить толщину границ объектов до одного пикселя.

Фильтр Отсечение позволяет ликвидировать отростки объектов активного цвета.

Фильтр Устранение граничных объектов служит для удаления объектов активного цвета, проходящих по границе изображения, что позволяет исключить их влияние на результаты измерений.

Фильтр Удаление пор позволяет удалить замкнутые несплошности (поры) внутри объектов на изображении, оставшиеся после применения сегментации по цвету или бинаризации.

Операция свёртки является матричной математической операцией. Их применение позволяет получать практически неограниченные по количеству эффекты на полноцветных изображениях. Ряд таких свёрток как *Сверхусиление*, *Подавление шумов*, *Подчёркивание границ*, *Лаплас*, *Гаусс*, *Воронка* и другие широко применяются при подготовке к анализу сложно-структурных изображений.

Сегментация по цвету является одной из важнейших операций, поскольку позволяет на исходном изображении со множеством цветовых оттенков выделить отдельным цветом требуемые объекты для последующего количественного анализа. В процессе фильтрации, точки изображения с оттенками, лежащими внутри указанного диапазона, выделяются цветом пользователя. В пределах действия одной фильтрации можно задавать до 16 типов объектов.

Цветовой сегментации обычно предшествует предварительная обработка с использованием методов тональной коррекции и цифровых фильтров, что позволяет получать лучшие результаты распознавания объектов на изображении.

Геометрическая фильтрация предназначена для выделения объектов с заданными геометрическими свойствами из массы объектов исходного цвета. В качестве пред-

варительной подготовки необходима сегментация по цвету или бинаризация.

Этот фильтр, наряду с цветовой сегментацией, является наиболее часто употребляемым инструментом при подготовке изображения к количественному анализу. При помощи геометрического фильтра можно производить разнообразные фильтрации; например, удалять (перекрашивать) включения меньше заданной площади, выделять частицы круглой формы и заданного диаметра, исключать слипшиеся частицы из дальнейшего анализа, раскрашивать зёрна цветами по баллам на основании данных ГОСТ по площади или по диаметру, и многое другое. Возможно использование сложно составных условий фильтрации.

Расчёты и Формирование отчёта

После ознакомления с демонстрационными версиями и полного затвердевания заготовки образца для приготовления микрошлифа произвести его выравнивание, шлифовку и полировку. Эти операции следует проводить в автоматическом режиме в соответствии с инструкцией по эксплуатации шлифовально-полировальной установки ВЕТА/1+VECTOR.

При травлении микроструктуры образца использовать в качестве травителя 4% раствор азотной кислоты, для промывки образца от продуктов травления использовать технический или медицинский спирт.

Исследование микрошлифа и получение цифрового изображения микроструктуры с увеличениями $\times 100$ (не травлено) и $\times 400$ (травлено) следует выполнять в соответствии с инструкциями по работе на соответствующем микроскопе и инструкцией по работе с соответствующим ААИ.

С помощью ААИ ImageExpert Pro 3 на копиях изображений провести масштабирование, цифровую коррекцию и фильтрацию исходного изображения $\times 100$ (не трав-

лено) для получения модельных цифровых изображений графитовых включений и при $\times 400$ (травлено) – модельных цифровых изображений перлита и феррита. Рассчитать количественные характеристики графита, перлита и феррита с помощью ААИ ImageExpert Pro 3. Разработать форму автоматического отчёта согласно приложения 3 и составить отчёт.

Определить количественные характеристики графита, перлита и феррита с помощью ААИ ImageExpertSample 2. Разработать форму автоматического отчёта согласно приложения 4 и создать отчёт.

Сравнить результаты отчётов, полученных с помощью различных методов ААИ ImageExpert Pro 3 и ImageExpertSample 2.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что изучает стереология?
2. Что такое геометрическая структура?
3. Назовите основные операции количественной металлографии.
4. Назовите элементы пространственного микроскопического строения.
5. Назовите основные методы количественной металлографии.
6. Назовите основные морфометрические параметры (факторы) формы микрочастиц.
7. Назовите оборудование и инструменты, применяемые для изготовления микрошлифов.
8. Опишите принцип действия оптического микроскопа.
9. Назовите основные методы получения оптического изображения.
10. Назовите состав систем анализа изображения микроструктур.
11. Назовите перечень общих функций и особенностей, которые необходимо оценивать при выборе ААИ.
12. Назовите основные причины погрешностей автоматических измерений с помощью ААИ.
13. Назовите основные инструменты ААИ, используемые для подготовки изображения к расчётам.
14. Назовите основные отличия методов количественной металлографии ImageExpert Pro 3 и ImageExpertSample 2.

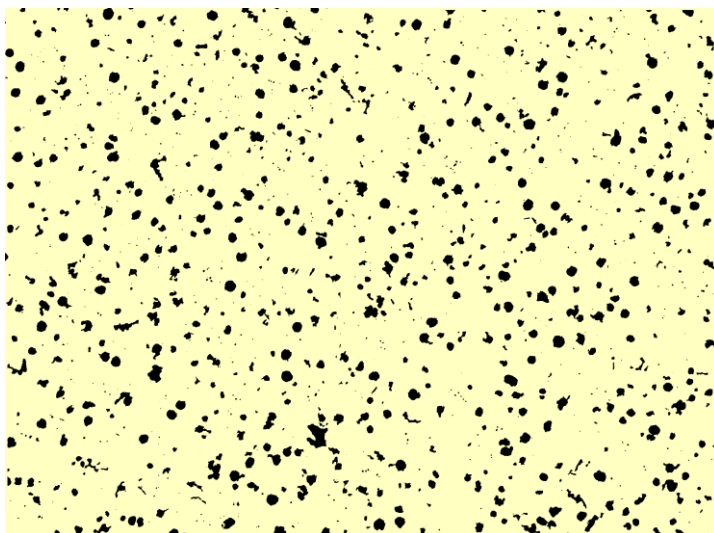
ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ОТЧЁТ

по исследованию характеристик графитовых включений

Кафедра: КМиТ
Дисциплина: ОПД.08 МИМиП
Инструмент: ImageExpert Pro 3

1. Типичный представитель микроструктуры, не травлено, $\times 100$:



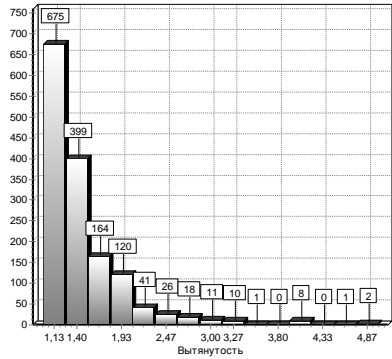
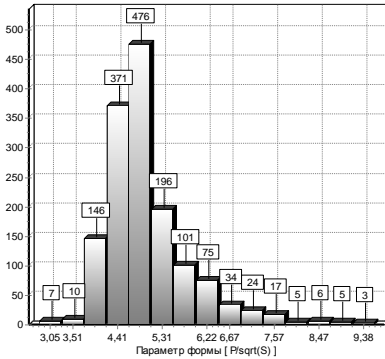
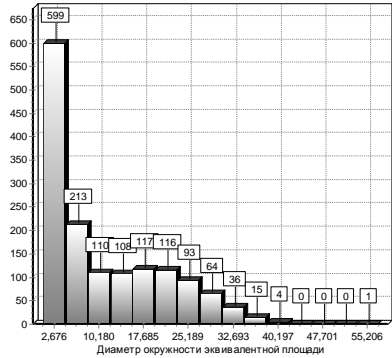
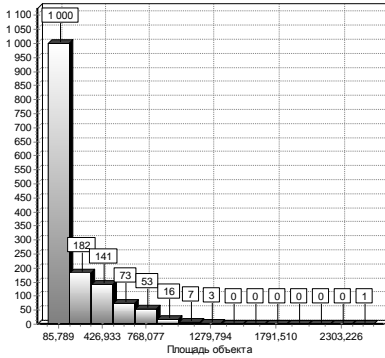
2,2(c)1.jpg

2. Отчёт по характеристикам:

Параметр	Сумма	Среднее	Отклонение
Площадь объекта, мкм ²	247535,547	167,707	6,3983
Процент по площади анализа	7,888	0,005	0,0002
Диаметр окружности эквивалентной площади, мкм	-	10,885	0,2538
Вытянутость	-	1,44	0,013
Средний диаметр, мкм	-	12,274	0,2957
Параметр формы [P/sqrt(S)]	-	4,99	0,022
Количество включений графита, шт/мм ²	471		

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 (продолжение)

3. Гистограммы распределения характеристик по количеству включений:



Исследование провёл:

Студент гр. 1306

Иванов И.И.

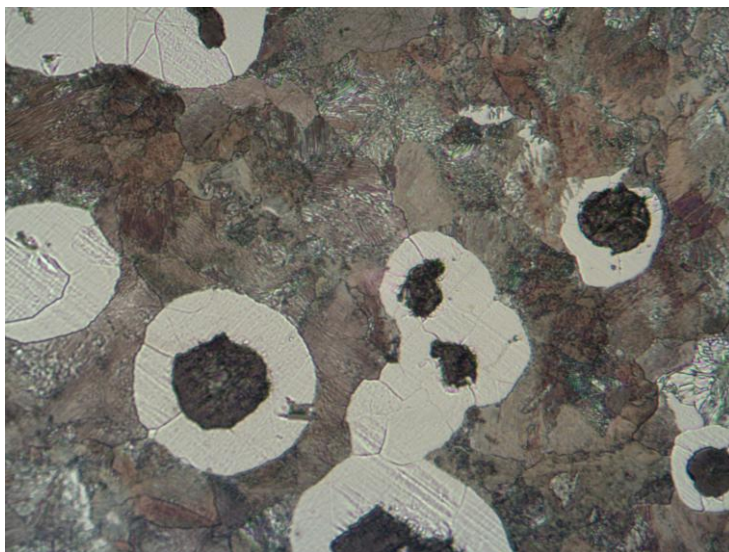
ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ОТЧЁТ

по исследованию формы графитовых включений и характеристик металлической основы в соответствии с ГОСТ 3443-87 (Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры)

Кафедра: КМиТ
Дисциплина: ОПД.08 МИМиП
Инструмент: ImageExpertSample 2

1. Количество исследованных полей зрения: 7
2. Типичный представитель микроструктуры, травлено, $\times 500$:



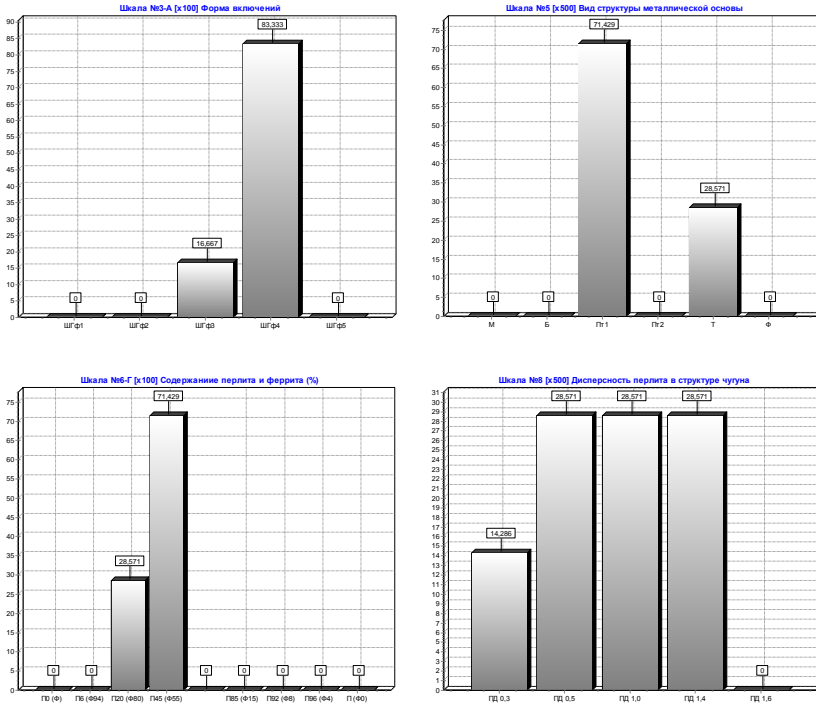
8x500.bmp

3. Отчёт по шкалам:

Шкала	Результат
Шкала №3-А [x100]	ШГф4
Шкала №5 [x500]	Пт1
Шкала №6-Г [x100]	П45 (Ф55)
Шкала №8 [x500]	ПД 0,5-ПД 1,0-ПД 1,4

ПРИЛОЖЕНИЕ 2 (продолжение)

4. Гистограммы распределения характеристик по полям зрения:



5. Результат исследования:

ШГф4-Пт1-П45 (Ф55)-ПД 0,5-ПД 1,0-ПД 1,4

Исследование провёл:

Студент гр. 1306

Иванов И.И.

ЛИТЕРАТУРА

1. Металловедение и термообработка стали: Справ. изд. – 3-е изд., перераб. и доп. В 3-х т.: Т.1 Методы испытаний и исследования / Под ред. Бернштейна М.Л. и Рахштадта А.Г. – М.: Металлургия, 1983, - 352 с.
2. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1970, – 376 с.
3. Егорова О.В., Егоров М.Ю. Современные металлографические микроскопы и методы исследования материалов // Цифровая микроскопия: Материалы школы-семинара. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. – С. 23-30.
4. Яковлев Ю.Р. Компьютерные системы анализа изображений в металлографических лабораториях: проблематика эффективности // Цифровая микроскопия: Материалы школы-семинара. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. – С.3-18.
5. ГОСТ 3443-87. Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры. (Введен с 01.07.88). М.: Изд-во стандартов, 1987. 12 с.
6. Mandelbrot B.B. The fractal geometry of nature. San Francisco: W.H.Freeman, 1982. – 460 p.
7. Петров М. С., Кадушников Р. М., Каменин И. Г. Алиевский В. М., Алиевский Д. М., Негашев В. С. Нурканов Е. Ю. Методы математической морфологии в задачах анализа изображений // Цифровая микроскопия: Материалы школы-семинара. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. – С.60-65.
8. Петров М. С., Кадушников Р. М., Каменин И. Г., Алиевский В. М., Алиевский Д. М., Негашев В. С., Нурканов Е. Ю. Методы повышения качества изображений и выделения деталей структуры // Цифровая микроскопия: Материалы школы-семинара. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. – С. 65-70.