

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

Лабораторная работа
«Компьютерный количественный анализ изображений
микроструктур углеродистых сталей и чугунов»

Электронное методическое пособие

САМАРА

2012

Составители: **Воронин Сергей Васильевич,**
Юшин Валентин Дмитриевич,
Бунова Галина Захаровна

Лабораторная работа «Компьютерный количественный анализ изображений микроструктур углеродистых сталей и чугунов» [Электронный ресурс] : электрон. метод. пособие / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); сост. С. В. Воронин, В. Д. Юшин, Г. З. Бунова. - Электрон. текстовые и граф. дан.(1,17 Мбайт). - Самара, 2012. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Лабораторная работа «Компьютерный количественный анализ изображений микроструктур углеродистых сталей и чугунов» представляет собой методическое руководство к лабораторной работе по курсу материаловедения. Целью данной лабораторной работы является освоение методик количественного анализа микроструктуры углеродистых сталей и чугунов с помощью компьютерной программы Image Expert 3.0.

Задачами лабораторной работы являются, получение изображений микроструктур доэвтектоидной, эвтектоидной и заэвтектоидной сталей, перенос изображений в компьютер, предварительная обработка изображений, определение объемной доли фазовых и структурных составляющих. По результатам анализа, студент определяет приблизительную марку углеродистой стали. Используя вышеописанный подход, студент должен произвести анализ микроструктур ковкого и серого чугунов – определить объемную долю графитовых включений.

Учебное методическое пособие предназначено для студентов инженерно-технологического факультета по направлению подготовки бакалавров 150400.62 «Металлургия» по профилю «Обработка металлов давлением», 5 семестр и бакалавров по направлению 150700.62 «Машиностроение» по профилю «Машины и технология обработки металлов давлением», 2 семестр в рамках дисциплины «Материаловедение».

Учебное методическое пособие разработано на кафедре технологии металлов и авиационного материаловедения.

©Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2012

Лабораторная работа

КОМПЬЮТЕРНЫЙ КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ МИКРОСТРУКТУР УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ

Цель работы: Освоение методик количественного анализа микроструктуры углеродистых сталей и чугунов с помощью компьютерной программы Image Expert Pro 3.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Основные понятия

Диаграмма железо-углерод в интервале концентраций от 0 до 6,67%С представлена на рис. 1.

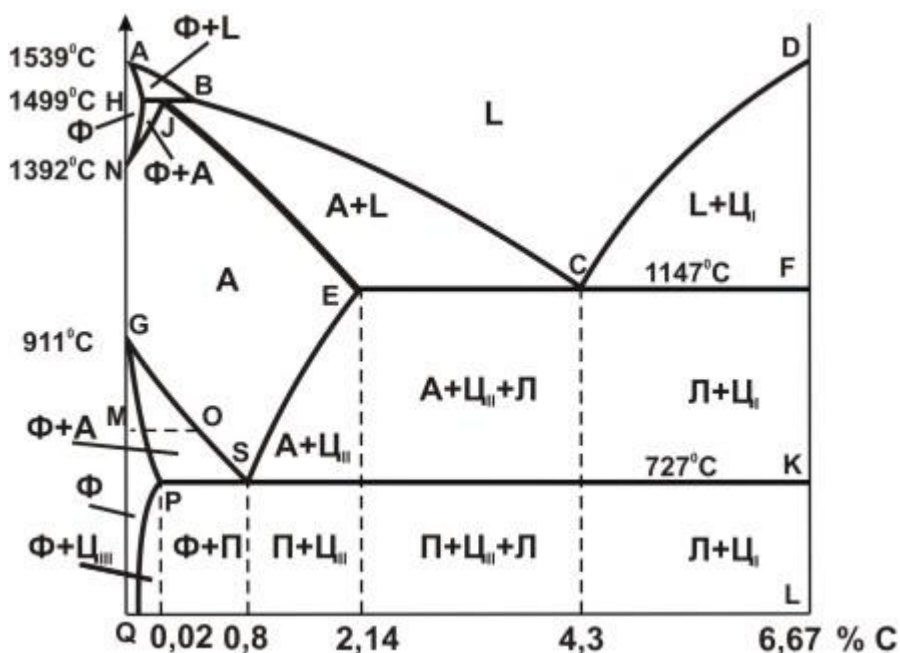


Рис.1. Диаграмма состояния железо-углерод

В рассматриваемых в диаграмме интервалах температур и концентраций железоуглеродистые сплавы имеют следующие структурные составляющие.

Жидкость – жидкий раствор углерода в железе. Жидкость обозначается в дальнейшем буквой «L».

Цементит – химическое соединение железа с углеродом, обозначается в дальнейшем буквой «Ц». В цементите содержится 6,67% С.

Феррит – твердый раствор углерода в Fe_α (ОЦК), обозначается в дальнейшем буквой «Ф». Максимальная растворимости углерода в железе 0,02% при температуре 727°C и 0,1%С – при температуре 1499°C. С понижением температуры растворимость уменьшается.

Аустенит – твердый раствор углерода в Fe_γ (ГЦК), в дальнейшем обозначается, буквой «А». Максимальная растворимость углерода в Fe_γ – 2,14% при температуре 1147°C. С понижением температуры растворимость

уменьшается.

Перлит – эвтектоидная смесь феррита и цементита. В перлите содержится 0,8% С. Перлит обозначается буквой «П».

Ледебурит – эвтектическая смесь аустенита и цементита (в температурном диапазоне от 727°С до 1147°С). При температурах ниже 727°С ледебурит представляет собой механическую смесь перлита и цементита. В ледебурите содержится 4,3%С. Обозначается ледебурит буквой «Л».

СТРУКТУРА ЖЕЛЕЗО УГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Сплавы, лежащие левее точки Q (0,006%С), состоят только из феррита, а сплавы, концентрации которых лежат в пределах от 0,006%С до 0,02%С имеют структуру – феррит и цементит третичный (рис. 2). Сплавы, имеющие концентрацию углерода от 0,02%С (точка «Р») до 0,8%С (точка «S»), называются доэвтектоидными сплавами. Их структура состоит из феррита и перлита. Сталь, содержащая 0,8%С, имеет структуру, состоящую из перлита (эвтектоидная смесь феррита и цементита пластинчатой формы). Стали, содержащие от 0,8 до 2,14%С, имеют структуру, состоящую из цементита «вторичного» и перлита. Доэвтектические чугуны, содержащие углерод 2,14 до 4,3%, имеют структуру: перлит, ледебурит и цементит «вторичный». Структура эвтектического чугуна (4,3%С) целиком состоит из ледебурита. Заэвтектические чугуны содержат углерода от 4,3 до 6,67% и имеют структуру, состоящую из цементита первичного и ледебурита.

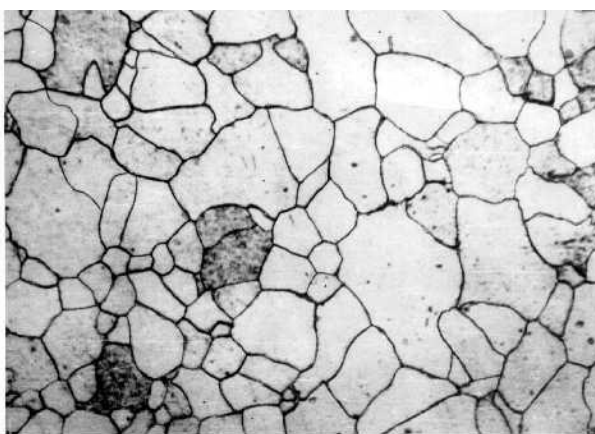


Рис. 2. Микроструктура технического железа

Особенности изображения микроструктуры железоуглеродистых сплавов

Микроструктура сталей с содержанием углерода до 0,15% представляется в следующем виде. Светлые зерна (полиэдры) феррита занимают подавляющую часть площади шлифа. Тонкими темными линиями являются границами ферритных зерен. Зерна перлита в виде небольших

темных остатков расположены в стыках между зернами феррита.

В образцах с большим содержанием углерода количество перлита возрастает и при содержании $C = 0,4 \div 0,45\%$ площади, занятые ферритом и перлитом, примерно равновелики. При еще большем содержании углерода феррита становится все меньше и он концентрируется в виде оболочки вокруг перлитных зерен и напоминает сетку (рис. 3).



Рис. 3. Микроструктура доэвтектоидной с содержанием углерода 0,45% (стали 45)

При $C = 0,5 \div 0,6\%$ эта сетка довольно толстая и местами разорвана, при повышении содержания углерода она становится все тоньше (рис. 4). При 0,7%С участки феррита расположены в стыках зерен перлита. У эвтектоидной стали ($C = 0,8\%$) структура состоит из сплошного темного перлита, который местами имеет пластинчатое строение (пластины феррита и цементита), а местами – глобулярное (сферические частицы цементита расположены на фоне феррита) (рис.5).



Рис. 4. Микроструктура доэвтектоидной стали с содержанием углерода 0,6%

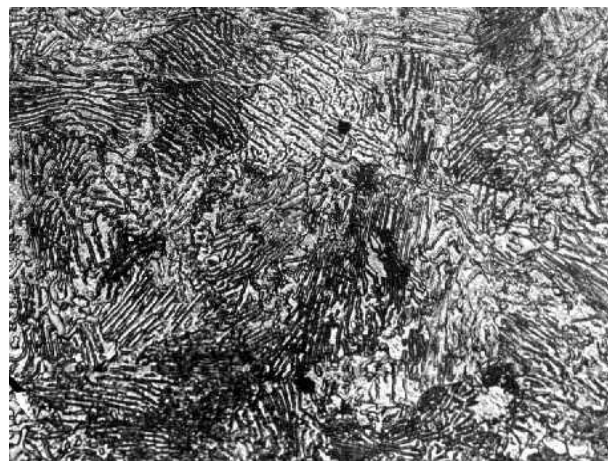


Рис. 5. Микроструктура эвтектоидной стали с содержанием углерода 0,8% (пластинчатое строение перлита)

В заэвтектоидной стали ($0,8 \div 1,4\%$) темные зерна перлита окружены очень тонкой светлой сеткой вторичного цементита. По цвету эта сетка мало

отличается от ферритной. Можно сказать, что она блестящая, а не матовая. Кроме того, цементитная сетка, в отличие от ферритной, непрерывная (рис. 6).

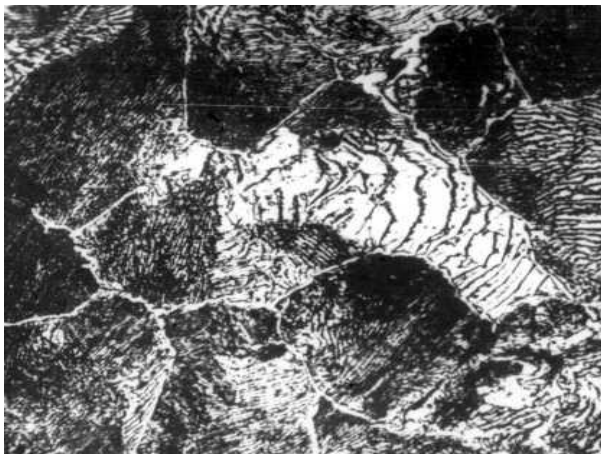


Рис. 6. Микроструктура заэвтектоидной стали с содержанием углерода 1,2% (сталь У12)

Под микроскопом структура *белого доэвтектического чугуна*, в котором весь углерод находится в связанном состоянии в виде цементита, представляет собой темные участки перлита дендритной формы, светлый блестящий вторичный цементит и ледебурит. Он представляет собой характерную пятнистую структуру, в которой небольшие участки перлита расположены на светлом фоне цементита (рис. 7).

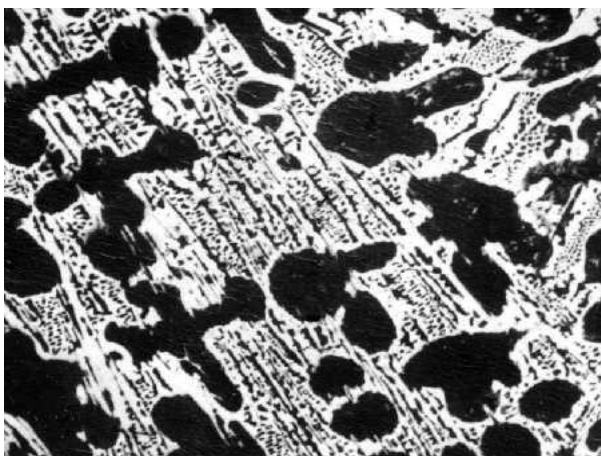


Рис. 7. Микроструктура доэвтектического белого чугуна с содержанием углерода 3,6%

Структура *эвтектического чугуна*: ледебурит, состоящий из светлого цементита и темного перлита. Ясно видно дендритное строение структуры (рис. 8).



Рис. 8. Микроструктура эвтектического чугуна с содержанием углерода 4,3%

Структура *заэвтектического чугуна*: удлиненные светлые блестящие пластины избыточного первичного цементита и ледебурита, состоящего из темного перлита и светлого цементита (рис. 9).

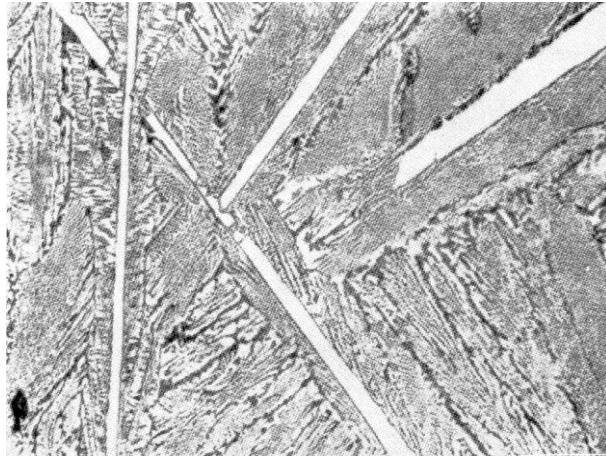


Рис. 9. Микроструктура заэвтектического чугуна с содержанием углерода 5%

Ковкие чугуны получают путем отжига отливок из белого чугуна. В ковком чугуне весь углерод или значительная его часть находится в свободном состоянии в форме хлопьевидного графита (углерода отжига). Ковкий чугун легко распознается под микроскопом благодаря тому, что графит в нем выделен в форме более или менее округлых темных комков (гнезд). Структура металлической основы ковкого чугуна может быть ферритной (рис. 10), ферритно-перлитной или перлитной. В ферритно-перлитных чугунах светлые выделения феррита обычно окаймляют гнезда графита.

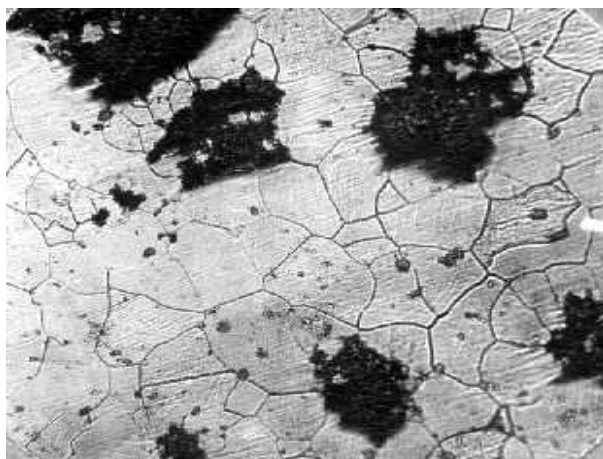


Рис. 10. Микроструктура ковкого чугуна на ферритной основе

Серые чугуны отличаются тем, что в них углерод в значительной степени или полностью находится в свободном состоянии в форме пластинчатого графита.

Перерезанные плоскостью шлифа эти пластины представляются в виде темных «червячков» (чешуек) или темных пятен, когда пластинка графита широким сечением частично совпадает с плоскостью шлифа. Структура металлической основы может быть либо чисто ферритной (редко) (рис. 11, а), либо ферритно-перлитной (рис. 11, б), либо чисто перлитной (рис. 11, в).

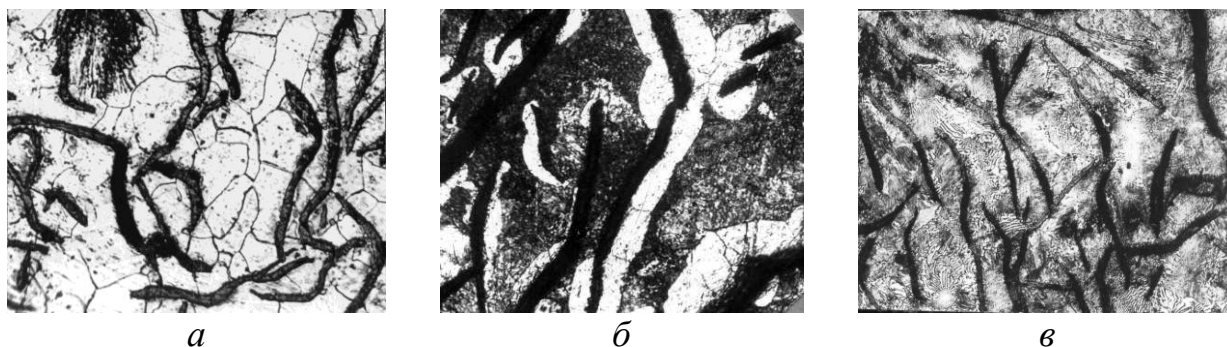


Рис. 11. Микроструктура серого чугуна на *а* – ферритной, *б* – ферритно-перлитной, *в* – перлитной основе

Благодаря более высокому по сравнению со сталью содержанию фосфора в чугуне часто наблюдается особая структурная составляющая – тройная фосфористая эвтектика (фосфористый феррит + фосфид железа + цементит). Ее структура напоминает пятнистый ледебурит, но мельче, а внешние границы участков ее залегания состоят из плавных дуг и острых углов.

Высокопрочные чугуны – это серые литейные чугуны, модифицированные магнием. В таких чугунах углерод в значительной степени или полностью находится в свободном состоянии в форме шаровидного графита. Металлическая основа может быть чисто ферритной (рис. 12, а), ферритно-перлитной (рис. 12, б), перлитной (рис. 12, в). У феррито-перлитного чугуна феррит, как правило, располагается вокруг

темного графита в виде белого кольца, а на остальной площади располагается серый перлит.

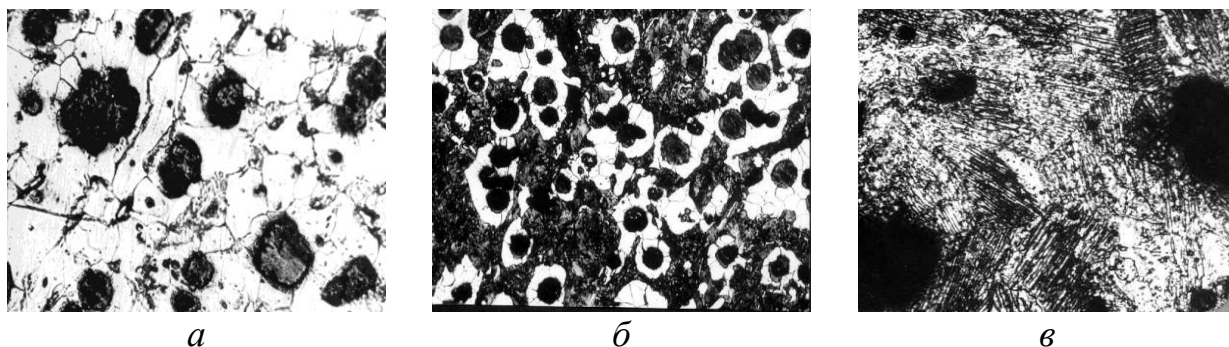


Рис. 12. Микроструктура высокопрочного чугуна на *a* – ферритной, *б* – ферритно-перлитной, *в* – перлитной основе

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА ПО КОЛИЧЕСТВЕННОМУ СООТНОШЕНИЮ СТРУКТУРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

По соотношению площадей, занимаемых структурными составляющими, можно определить содержание углерода в углеродистой (нелегированной) стали и ее марку при условии, что сталь находится в равновесном (отожженном) состоянии.

Структура доэвтектоидной стали – феррит и перлит. Содержание углерода в феррите из-за незначительности этой величины (0,006%) не учитывают и считают, что он весь находится в перлите. Перлит содержит 0,8% углерода. Если знать процентное количество перлита в общем объеме стали ($P\%$), то (поскольку плотности феррита и перлита близки) можно рассчитать содержание углерода в стали ($C\%$) по формуле

$$C = \frac{0,8\% \cdot P\%}{100\%} \cdot$$

Оценка соотношения перлита в структуре доэвтектоидной стали производится с помощью компьютерной программы количественного анализа изображений Image Expert Pro 3.

Методика обработки структуры доэвтектоидной стали

На первом этапе необходимо загрузить растровое изображение исследуемой микроструктуры в базу данных программы (Открыть изображение) (рис. 3). Далее нажав кнопку «Цифровая фильтрация» открываем диалоговое окно «Фильтры», выбираем закладку «Качественные» и применяем фильтр «Медианный». Медианный фильтр позволяет сгладить пульсации яркости. В отличие от порогового фильтра, лучше сохраняет

межфазовые переходы. Устанавливаем значение радиуса анализа небольшое, равное 2, т.к. размеры частиц фазы небольшие и имеют сильно изрезанные контуры. Применяем выбранные фильтры с помощью кнопки «Использовать». Затем выбираем закладку «Спектральные» и применяем фильтр «Градиент» или «Макронеоднородность», для устранения неоднородности освещения образца. Далее выделяем объекты для анализа с помощью кнопки «Выделение объектов по цвету». В окне «Сегментация по цвету» выбираем цвет выделения (например, зеленый). Затем ползунком диаграммы выделяем ее минимальную часть, поскольку эта часть является оптимальной для сегментации. Нажимаем кнопку «Применить».

Приступаем к измерениям, для этого нажимаем кнопку «Информация для всех объектов» и щелкаем левой кнопкой мыши по одному из объектов. Переходим в закладку «Данные» для анализа результатов. В строке «Процент по площади анализа», в столбце «Сумма» указана концентрация перлита в процентах (P%).

Конструкционные углеродистые стали маркируются двухзначным числом, указывающим среднее содержание углерода в сотых долях процента. Марки чередуются так: 05; 08; 10; 15; 20; 25 и т. д. до 65. Инструментальные стали, содержащие от 0,7 до 1,3% углерода, маркируются буквой У и числом, указывающим среднее содержание углерода в десятых долях процента: У7, У8, У9, У11, У12, У13.

В заэвтектоидной стали углерод содержится в обеих структурных составляющих: в перлите 0,8% и во вторичном цементите – 6,67%. Поэтому расчет содержания углерода в ней производится суммированием его содержания в той и другой структурной составляющей:

$$C = \frac{0,8\% \cdot P\%}{100\%} + \frac{6,67 \cdot Ц\%}{100\%} .$$

В заэвтектоидной стали доля площади шлифа, занимаемая сеткой вторичного цементита, мала (до 10%) и поэтому целесообразно использовать вышеописанную методику «Методика обработки структуры доэвтектоидной стали» для более точного определения значения (Ц%) и (P%).

Методика обработки структуры по методу площадей

При анализе микроструктуры технически чистого железа (рис. 2) целесообразно использовать метод площадей для определения величины зерна. Этот метод применим для структур с четкими границами зерен.

Для предварительной обработки изображения микроструктуры выбираем «Цифровую фильтрацию», в закладке «Качественный» выбираем медианный фильтр с наименьшим радиусом анализа (равный 1), чтобы не размыть тонкие границы. Для устранения неравномерности освещения шлифа применим фильтр «Макронеоднородность» с максимальной зоной

анализа (равной 50) в закладке «Спектральные» (рис. 13).

Далее для увеличения четкости границ зерен применим механизм сверток – «Сверхусиление 5x5». Для выделения сетки границ ферритных зерен произведем цветовую сегментацию изображения. Кнопкой «Выделение объектов по цвету» в окне «Сегментация по цвету» выбираем цвет маркера (красный) и ползунком диаграммы выбираем минимум, который соответствует оптимальному выбору порога преобразования.

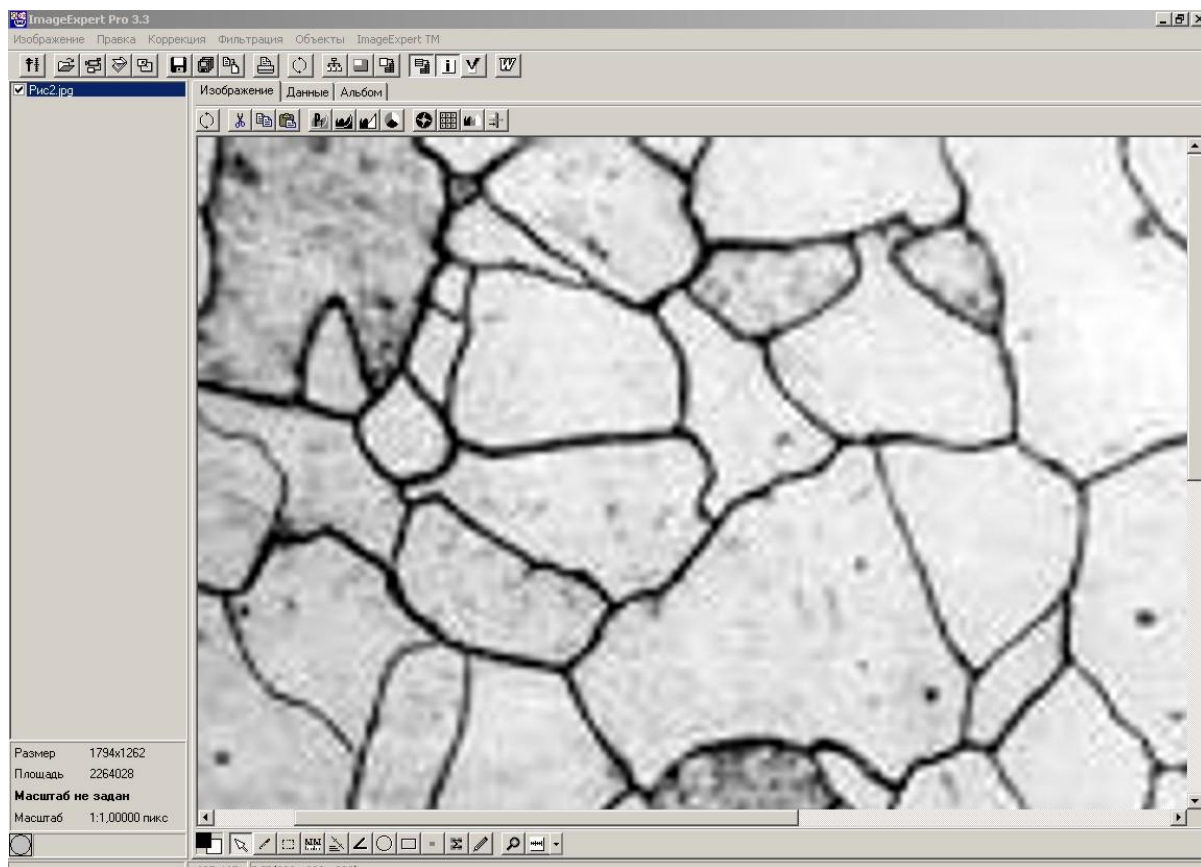


Рис. 13. Диалоговое окно программы Image Expert Pro 3

При работе с зеренной структурой, перед применением операции, рекомендуется выбирать двухцветный режим представления результатов, поэтому выбираем «Цвета на белом фоне». Далее необходимо удалить небольшие вкрапления в теле зерен посредством применения параметрического фильтра. Для этого нажимаем кнопку «Фильтрация объектов по геометрическим параметрам», указываем цвет анализируемых объектов (красный), в разделе «Параметры фильтрации» устанавливаем галочку на строку «Площадь объектов» и вводим верхний предел по площади для выделяемых мелких объектов (50), выбираем белый цвет, так чтобы мелкие объекты слились с фоном.

Затем необходимо провести скелетизацию – устанавливаем активный цвет, соответствующий цвету сетки границ (красный). Полученное бинаризованное изображение подвергаем обработке группой морфологических фильтров. Для этого нажимаем кнопку «Цифровая

филтрация» и в закладке «Морфологические» выбираем «Скелетизация», которая позволяет сделать границы зерен тонкими (активный цвет соответствует цвету границ).

Функция «Соединение» позволяет восстановить в ряде случаев разорванные границы зерен. Затем используется функция «Дилатация», которая вызывает равномерное расширение объектов активного цвета, что наряду с последующей повторной скелетизацией позволяет устранить немногочисленные неправильные соединения предыдущего фильтра (зона анализа равна 1).

Целесообразно повторить этот набор морфологических фильтров с целью восстановления большего числа потерянных границ. Оставшиеся хвостики границ удаляются с помощью фильтра «Отсечение». При помощи инструмента «Пробы цвета» устанавливаем активный цвет, соответствующий цвету самих зерен (белый). Вновь открываем диалоговое окно «Фильтры» через кнопку «Цифровая филтрация» и в закладке «Морфологические» выбираем фильтр «Удаление граничных объектов», который позволяет исключить из анализа неполные зерна, расположенные по границам поля зрения.

Произведем расчет параметров выбранных зерен белого цвета. Для этого нажимаем кнопку «Информация о всех объектах» и указываем любое зерно. Затем переходим в закладку «Данные» для анализа полученных результатов. В качестве параметра для графического построения укажем «Площадь объекта». После чего на экране появится гистограмма распределения зерен по размерам, а в разделе «Общие» будет находиться информация о среднем диаметре зерна в материале.

Методика определения концентрации графитовых включений

В микроструктуре белых доэвтектических чугунов, состоящей из ледебурита, перлита и вторичного цементита, не всегда удастся отделить цементит ледебуритный от вторичного цементита. Затруднительно и определение общего количества перлита и цементита. Однако анализ микроструктур белых доэвтектических чугунов возможно производить с помощью программы Image Expert Pro 3 на растровых изображениях сделанных при больших увеличениях.

Для определения объемной доли графитовых включений используется весь набор фильтров применяемых в методике обработки структуры доэвтектоидной стали. Отличие заключается в том, что в главном меню, в пункте «Объекты» выбираем инструмент для анализа «Концентрация», а далее аналогично получаем результаты в закладке «Данные».

В серых высокопрочных и ковких чугунах содержание углерода по микроструктуре определяется только в металлической основе по имеющемуся в структуре шлифа перлиту. Маркировка их производится по механическим свойствам. Например, СЧ12 – это серый чугун, у которого $\sigma_b = 120\text{МПа}$; ВЧ60-2 – высокопрочный чугун у которого $\sigma_b = 600\text{МПа}$, $\delta = 2\%$;

КЧ37-12 – ковкий чугун $\sigma_B = 370\text{МПа}$ и $\delta = 12\%$.

КОНТРОЛИРУЕМЫЙ МИНИМУМ ЗНАНИЙ

1. Воспроизвести, на память диаграмму железо-углерод.
2. Указать для каждой области диаграммы структурный и фазовый составы сплавов.
3. Дать характеристику и указать примерные механические свойства (твердость) каждой структурной составляющей.
4. Описать изображение каждой структурной составляющей.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

Задачи работы

1. Овладение теоретическими знаниями о микроструктурах сталей и чугунов в равновесном состоянии.
2. Практическое знакомство с изображением микроструктур сталей и чугунов под микроскопом.
3. Закрепление, навыков работы с металлографическим микроскопом и передачей полученных растровых изображений микроструктур в базу данных персонального компьютера.
4. Приобретение навыков работы в программной среде Image Expert Pro 3.
5. Освоение методик количественного анализа изображений микроструктур различных типов.

МАТЕРИАЛЬНОЕ ОСНАЩЕНИЕ

1. Методические разработки по данной работе.
2. Персональный компьютер с установленным лицензионным программным обеспечением Image Expert Pro 3.
3. Микроскоп МИМ-7 с цифровой видео камерой.
4. Образцы сталей и чугунов.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ И СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Ознакомиться с теорией и изложить ее основные положения в отчете.
2. Изобразить в отчете диаграмму железо-углерод с указанием фаз и структурных составляющих во всех ее областях.
3. С помощью металлографического микроскопа с цифровой видео камерой получить растровые изображения исследуемых структур технически чистого железа, доэвтектоидных, эвтектоидных и заэвтектоидных сталей, а также белых, серых, ковких и высокопрочных чугунов.

4. В программе Image Expert Pro 3 провести количественный анализ – у технически чистого железа определить средний размер зерна по методу площадей, построить гистограмму распределения размеров зерен; у доэвтектоидных и заэвтектоидных сталей определить объемную долю перлита, цементита.
5. В программе Image Expert Pro 3 провести количественный анализ чугунов – серых, ковких и высокопрочных. С помощью функций программы определить концентрацию графита.
6. Подсчитать количество углерода в каждом образце (для чугунов подсчитать только количество связанного углерода в графит).
7. Установить марку стали, используя описания структуры и свойств.
8. Все данные свести в таблицу отчета.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуляев А. П. Металловедение. М.: Металлургия, 1986. С. 156-193.
2. Бунова, Г. З. Авиаматериаловедение. Ч. 1 [Текст] : учеб. пособие / Г. З. Бунова, В. Д. Юшин, С. В. Воронин ; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Самара, 2012.