

Алгоритмы распознавания и определения процентного соотношения фаз в сплавах

A.SH. LYUBANOVA
Siberian Federal University
e-mail: lubanova@mail.ru

В.И. АНИКИНА
Сибирский федеральный университет
e-mail: vanikina@sfu-kras.ru

С.В. КАПУСТИНА
Сибирский федеральный университет
e-mail: sv_kapustina@mail.ru

Разработаны новые алгоритмы распознавания фаз сплава. Они опираются на основные принципы металлографии, методы нечеткой математики и статистические методы распознавания образов. Алгоритмы позволяют строить математическую модель каждой фазы в виде нечеткого множества по контрольным точкам на снимке. На основе этих алгоритмов создана информационная система, способная обрабатывать как черно-белые микрофотографии, так и цветные изображения многофазных сплавов, включающих до 10 фаз. Программа позволяет распознавать фазы сплава, как многосвязные геометрические объекты и рассчитывать процентный состав сплава.

1. Введение

Методы количественной оценки распределения фаз сплавов имеют значительное распространение в металлографической практике. Соотношение количества фаз позволяет определить марку сплава, его химический состав и механические свойства (твердость, прочность), что объясняет актуальность создания информационных систем для решения задач металлографии.

Объектом анализа является растровое изображение микроструктуры сплава. Исходный материал для обработки на компьютере может быть получен разными путями: сканирование иллюстрации, загрузкой готового изображения или трансляцией изображения от цифровой фото- или видеокамеры. Растровое изображение может состоять из нескольких областей, соприкасающихся только границами. Каждая такая область является графическим объектом.

Любой металл или сплав с точки зрения пространственного расположения фаз представляет собой конгломерат, состоящий из множества микроскопических тел, которые заполняют исследуемый участок пространства и прочно связаны между собою по контактными поверхностями (рис. 1).

Всякую частицу в сплаве следует рассматривать как геометрическое тело микроскопических масштабов. Как и всякое геометрическое тело, микрочастица обладает вполне определенной формой и геометрическими параметрами - линейными размерами, величиной поверхности, объемом и так далее. Вполне естественно воспользоваться именно этими геометрическими величинами для количественной

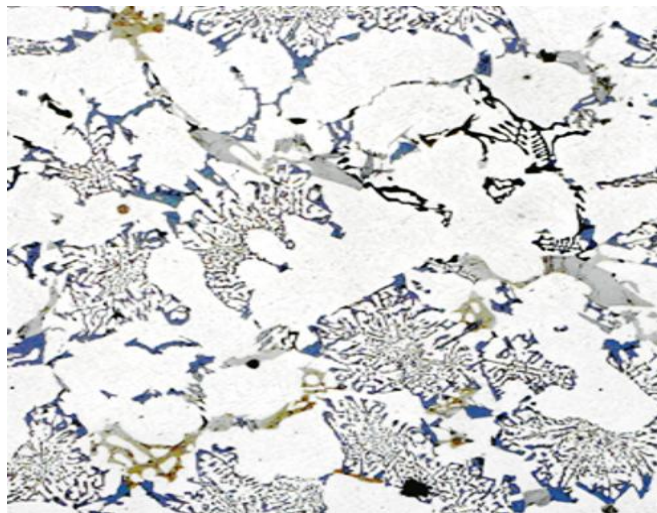


Рис. 1. Микроструктура сплава АК12

оценки микроскопических частиц и структуры в целом, как их совокупности. Однако в объеме исследуемого металла едва ли найдутся хотя бы две микрочастицы, полностью тождественные по форме и размерам, поэтому можно говорить только об использовании статистически средних величин геометрических параметров. Следует отметить, что микроскопическая структура, представляющая практически бесконечное множество однотипных микрочастиц, - чрезвычайно благоприятный объект для применения к нему статистических методов исследования и анализа.

Все вышесказанное в полной мере относится к графическому (растровому) изображению сплава, являющемуся отражением плоскостного строения сечений микрочастиц и их взаимного расположения на шлифе. Растровое изображение может состоять из нескольких областей, соприкасающихся только по их границам. Каждая такая область является графическим объектом. Исходный материал для обработки на компьютере может быть получен разными путями и с разным разрешением: сканирование иллюстрации, загрузкой готового изображения или трансляцией изображения от цифровой фото- или видеокамеры. Кроме того, различные дефекты обработки поверхности шлифа, цветовая неоднородность, а также потеря четкости растрового изображения при масштабировании могут приводить к искажению или размытости границ графического объекта.

Перечисленные соображения указывают на то, что в данном случае наиболее подходящими для моделирования графического объекта и решения задач микроструктурного анализа являются методы математической статистики и нечеткой математики.

В настоящей работе представлен алгоритм распознавания многосвязных графических объектов, который моделирует графический объект в виде нечеткого множества и использует байесовский линейный классификатор [1]. Многосвязным графическим объектом в данной работе является изображение - фаза, состоящая из областей, отделенных друг от друга границами. На основе этого алгоритма создана информационная система [2], способная обрабатывать изображения в оттенках серого и цветные изображения многофазных сплавов, включающих до 10 фаз, позволяющая решать задачи металлографии, в частности определять фазовые соотношения в сплаве.

2. Алгоритм распознавания фаз

Каждый из графических объектов на цветном изображении микроструктуры сплава будем называть фазой. Количество фаз обозначим через N .

Растр или растровый массив представляет собой совокупность битов, расположенных на сетчатом поле - канве. Основным элементом растрового изображения является пиксель. Как известно, цвет каждого пикселя состоит из трех основных цветов и может быть представлен точкой с тремя координатами. Кроме информации о цвете каждого пикселя в растровом файле хранятся размеры изображения в пикселях по горизонтали и по вертикали и координаты каждого пикселя.

Пусть D - вся цветовая шкала. Цветовую шкалу D представим как множество точек с координатами r, g, b , где r, g и b - это значения цветовых каналов красного, зеленого и синего. Тогда каждой фазе можно поставить в соответствие некоторое подмножество D_i множества D , $i = 1, 2, \dots, N$. Причем

$$\bigcup_{i=1}^N D_i = D$$

и при любых i и j , $i \neq j$, выполняется $D_i \cap D_j = \emptyset$.

Введем для каждой точки изображения дополнительный параметр a , значение которого равно номеру фазы, к которой относится точка, $a = 1, 2, \dots, N$. Если принадлежность точки какой-либо фазе еще не определена, то принимаем $a = 0$.

Математическая модель каждой фазы строится в виде нечеткого множества D_i . Алгоритм построения множества D_i начинается со статистической экспертизы, состоящей из следующих этапов.

Этап 1. Пусть известно множество z_i контрольных точек для i -й фазы, $i = 1, 2, \dots, N$. Число элементов во всех z_i предполагается одинаковым и равно n . Кроме того, считаем, что если точка M из z_i принадлежит i -й фазе, то этой фазе принадлежит и некоторая окрестность U_M , т. е. квадрат с центром в точке M (в частности, восемь соседних точек). Такой подход соответствует основной идее алгоритма построения бесконечного исходного множества альтернатив в задачах принятия решений [3]. Таким образом, мы получаем множество $\bigcup_{i=1}^n U_{Mi} = Z_i$ состоящее из m элементов, отнесенных к i -й фазе.

Этап 2. Для изображений в оттенках серого, цветовой спектр которых состоит из 256 оттенков, строится статистическое распределение оттенков для каждой из фаз. Тем самым определяются статистические вероятности наличия k -го оттенка в i -й фазе, $i = 1, 2, \dots, N$.

Обозначим статистические вероятности наличия оттенка точки M изображения через $p'_i(M)$, $i = 1, 2, \dots, N$. Значения функции принадлежности i -й фазы для каждой точки M (вероятности отнесения точки M к i -й фазе) находятся по формуле

$$\mu_i(M) = p'_i(M) \left[\sum_{j=1}^N p'_j(M) \right]^{-1}.$$

В цветных изображениях цвет каждой точки задается тремя координатами r, g, b , поэтому он описывается трехмерной случайной величиной (R, G, B) . Множество Z_i в этом случае представляет собой статистическую выборку (R_i, G_i, B_i) из генеральной совокупности значений данной трехмерной случайной величины.

По полученной выборке Z_i находим центр рассеивания, координатами которого являются несмещенные оценки математических ожиданий (выборочные средние)

$\bar{r}_B^i, \bar{g}_B^i, \bar{b}_B^i$. Затем определяем исправленные средние квадратические отклонения

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_r^i &= \left[\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (r_k^i - \bar{r}_B^i)^2 \right]^{1/2}, \\ \bar{\sigma}_g^i &= \left[\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (g_k^i - \bar{g}_B^i)^2 \right]^{1/2}, \\ \bar{\sigma}_b^i &= \left[\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (b_k^i - \bar{b}_B^i)^2 \right]^{1/2}.\end{aligned}$$

и вычисляем границы доверительных интервалов для каждого из математических ожиданий (m_r^i, m_g^i, m_b^i) случайных величин R^i, G^i и B^i соответственно, предполагая, что эти величины подчиняются нормальному закону. Доверительные интервалы при заданной доверительной вероятности γ имеют вид

$$\begin{aligned}\bar{r}_B^i - t_\gamma(n) \frac{\bar{\sigma}_r^i}{\sqrt{n}} &< R^i < \bar{r}_B^i + t_\gamma(n) \frac{\bar{\sigma}_r^i}{\sqrt{n}}, \\ \bar{g}_B^i - t_\gamma(n) \frac{\bar{\sigma}_g^i}{\sqrt{n}} &< G^i < \bar{g}_B^i + t_\gamma(n) \frac{\bar{\sigma}_g^i}{\sqrt{n}}, \\ \bar{b}_B^i - t_\gamma(n) \frac{\bar{\sigma}_b^i}{\sqrt{n}} &< B^i < \bar{b}_B^i + t_\gamma(n) \frac{\bar{\sigma}_b^i}{\sqrt{n}},\end{aligned}$$

где $t_\gamma(n)$ - это квантиль распределения Стьюдента при заданных γ и n . Строим шар Π_i с центром в точке $(\bar{r}_B^i, \bar{g}_B^i, \bar{b}_B^i)$ радиуса

$$\rho = \sqrt{(\delta_r^i)^2 + (\delta_g^i)^2 + (\delta_b^i)^2},$$

где $\delta_r^i = t_\gamma(n) \bar{\sigma}_r^i / \sqrt{n}$, $\delta_g^i = t_\gamma(n) \bar{\sigma}_g^i / \sqrt{n}$, $\delta_b^i = t_\gamma(n) \bar{\sigma}_b^i / \sqrt{n}$.

Этап 3. Каждый пиксель изображения проверяется на принадлежность к одной из фаз i -й или j -й с помощью байесовского решающего правила [4]. Для изображений в оттенках серого используем построенные функции принадлежности и следующее решающее правило: если

$$\max_{i=1,2,\dots,N} \mu_i(M) = \mu_{i^*}(M),$$

то точка M относится к фазе с номером i^* .

Для цветных изображений все точки, попадающие в шар Π_i будем относить к i -й фазе. Во всех остальных случаях (в том числе и в случае, когда точка попадает более чем в один шар) применяется следующий алгоритм. Точка проверяется на принадлежность к одной из двух фаз i -й или j -й с помощью байесовского решающего правила для нормально распределенных случайных величин [4], которое в данном случае принимает вид: для каждой точки $X = (R, G, B)$

$$\begin{aligned}\frac{1}{2D_{\text{общ}}^i} \left((R - \bar{r}_B^i)^2 + (G - \bar{g}_B^i)^2 + (B - \bar{b}_B^i)^2 \right) - \frac{1}{2D_{\text{общ}}^j} \left((R - \bar{r}_B^j)^2 + (G - \bar{g}_B^j)^2 + (B - \bar{b}_B^j)^2 \right) \\ + \frac{3}{2} \ln \frac{D_{\text{общ}}^i}{D_{\text{общ}}^j} \leq 0 \rightarrow X \in \begin{cases} \omega_j \\ \omega_i \end{cases},\end{aligned}\quad (1)$$

где $D_{\text{общ}}^i = (D_R^i D_G^i D_B^i)^{1/3}$ - общая дисперсия i -й фазы, $D_R^i = (\bar{\sigma}_r^i)^2$, $D_G^i = (\bar{\sigma}_g^i)^2$ и $D_B^i = (\bar{\sigma}_b^i)^2$ - дисперсии основных цветов. Далее по этому же правилу точка проверяется на принадлежность к выбранной фазе и следующей из еще не проверенных фаз. Таким образом, после проверки всех фаз определяется конечная принадлежность точки к одной из них.

3. Определение структурного объемного состава сплава

Методы определения структурного объемного состава сплава основываются на так называемом принципе Кавальери [1]. Применительно к количественному микроскопическому анализу принцип Кавальери состоит в следующем: если несколько групп контуров на плоскости, расположенных между параллельными прямыми, имеют пересечения (отрезки), длины которых находятся в постоянном отношении на любой линии, параллельной двум данным, то площади этих групп контуров находятся в том же отношении (рис.3).

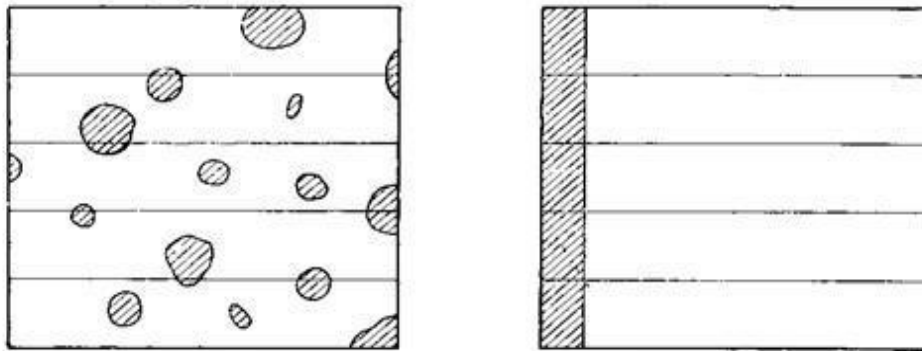


Рис.2. Схема структурного двухфазного сплава с равномерным распределением второй фазы на плоскости сечения

Используя принцип Кавальери, можно заменить измерение площадей двух сравниваемых фигур измерением отрезков прямых линий, а измерение объемов двух сравниваемых тел - измерением площадей. Иначе говоря, принцип Кавальери дает возможность понизить на одну степень размерность измеряемых элементов по сравнению с размерностью самих сравниваемых объектов. Таким образом, долю объема сплава, занятую некоторой фазой, можно определить с помощью измерения суммарной площади сечений микрочастиц этой фазы на площади шлифа.

Алгоритм определения структурного объемного состава сплава включает следующие этапы:

- а) построение модели каждой фазы по алгоритму распознавания фаз, описанному выше;
- б) перебор всех точек изображения, классификация цвета по решающему правилу (1) и вычисление площадей фаз S_k :

$$S_k = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^L h_k(C(i, j)), k = 1, 2, \dots, N,$$

где $K \times L$ - размеры изображения в пикселях, $C(i, j)$ - значение цвета пикселя (i, j) ; S_k - количество точек, отнесенных к k -й фазе, функция $h_k(C(i, j))$ принимает значение 1, если пиксель (i, j) отнесен к k -й фазе, и 0 в противном случае;

- в) вычисление процентного соотношения площадей фаз:

$$\frac{S_k}{K \cdot L} \cdot 100\%.$$

На основе этого алгоритма было создано программное приложение "Analizer v2.4"[2], которое распознает графические объекты на цветных изображениях (рис. 3) и производит количественный анализ фазового состава сплавов. При этом подразумевается, что пользователь знает химический состав сплава. Программное приложение имеет простой, "интуитивный" интерфейс, обеспечивающий комфортную работу человеку знакомому с компьютером на уровне простого пользователя; автоматически компоновать изображения в архивы; сохраняет как сам архив, так и информацию, полученную в процессе работы для последующего уточнения; обеспечивает возможность продолжения работы и пополнения архива в дальнейшем; создает отчеты в собственных формах без участия программ-посредников (MS Word, MS Excel и подобных). база статистических данных хранится независимо от сторонних приложений.

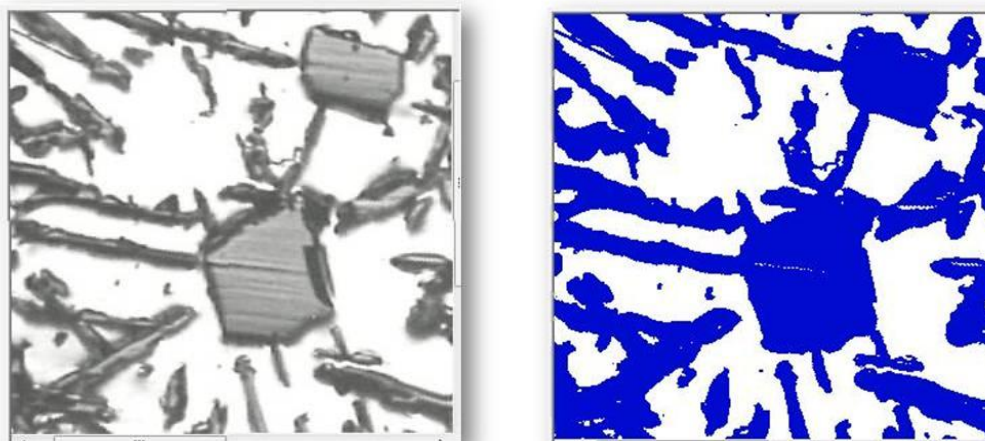


Рис 3. Результаты распознавания фаз (справа) сплава алюминия с кремнием (слева) с помощью программы "Analizer v2.4".

В программе предоставлена возможность задавать количество фаз в текущем сплаве и количество контрольных точек для каждой фазы (не более 10). Приложение может обрабатывать любое число полей. Причем обучившись на контрольных точках одного поля, оно обсчитывает все остальные поля автоматически. Время работы программы с одним образцом составляет не больше 10 минут. Численные эксперименты, проведенные на различных сплавах алюминия и меди показали, что погрешность определения процентного соотношения фаз составляет в среднем 2-3%.

Список литературы

- [1] САЛТЫКОВ С.А. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1970.
- [2] ЛЮБАНОВА А.Ш., АНИКИНА В.И. Программа для ЭВМ "Analizer v2.4". Патент. Регистрационное свидетельство № 2010616883 от 14.10.2010.
- [3] Теория выбора и принятия решений / И.М. Макаров, Т.М. Виноградская, А.А. Рубчинский, В.Б. Соколов. М.: Наука, 1982.
- [4] ФУКУНАГА К. Введение в статистическую теорию распознавания образов. М.: Наука, 1979.