

между структурными составляющими разных типов. Примеры: сетка вторичного цементита в стали, тройная фосфидная эвтектика в сером чугуне, α -феррит в аустенитной стали.

Матричная структура (рис. 1.3,г)

Одна фаза образует основу (матрицу) структуры, в которой располагаются частицы одной или нескольких других фаз. Примеры: структуры, возникающие в результате процессов выделения, в частности в сплавах меди с алюминием или меди с хромом; в никелевых жаропрочных сплавах, структура неполного отжига стали, эвтектическая и эвтектоидная структуры, выделения карбидов в высоколегированных сталях.

Ориентированная структура (рис. 1.3,д)

Примеры: вытянутые зерна катаных или тянутых металлов и сплавов.

1.2.2. Основные методы количественной металлографии

1. Анализ по площадям. Этот метод позволяет определить объемную долю отдельных фаз в структуре сплава и распределение микрочастиц различных фаз по размерам.

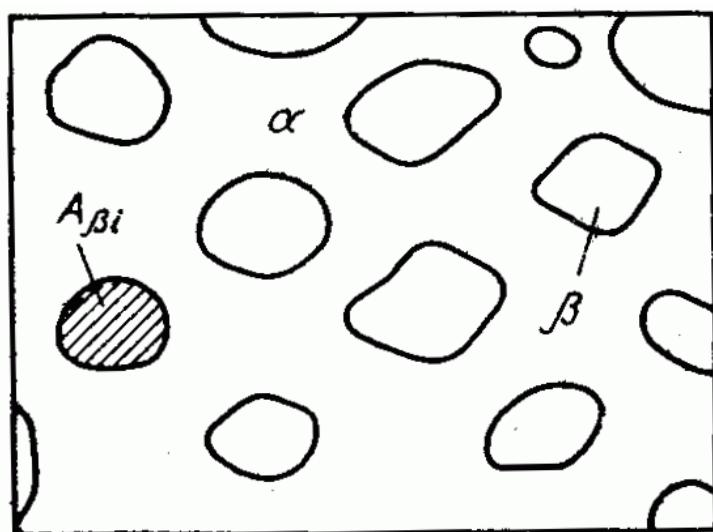


Рис. 1.4. Планиметрирование сечений элементов структуры при проведении анализа по площадям.

Объемная доля V_β фазы β определяется через сумму отдельных сечений $A_{\beta i}$ в пределах общей площади А:

$$V_\beta = \frac{\sum_{i=1}^{m_\beta} A_{\beta i}}{A} \cdot 100 \text{ \%}.$$

2. Определение среднего размера зерен. Для однофазно-полиэдрической структуры возможно определение средней площади зерна A (средней площади сечений в плоскости шлифа) путем подсчета зерен, находящихся в пределах заданной измеряемой площади (рис. 1.5):

$$\bar{A} = A/(u + 0,5v + 0,25w),$$

где u – число зерен, полностью попавших в пределы заданной измеряемой площади; v – число зерен, по которым проходит граничная линия измеряемой площади; w – число зерен, находящихся в углах измеряемой площади (для квадратной и прямоугольной площади равно 4).

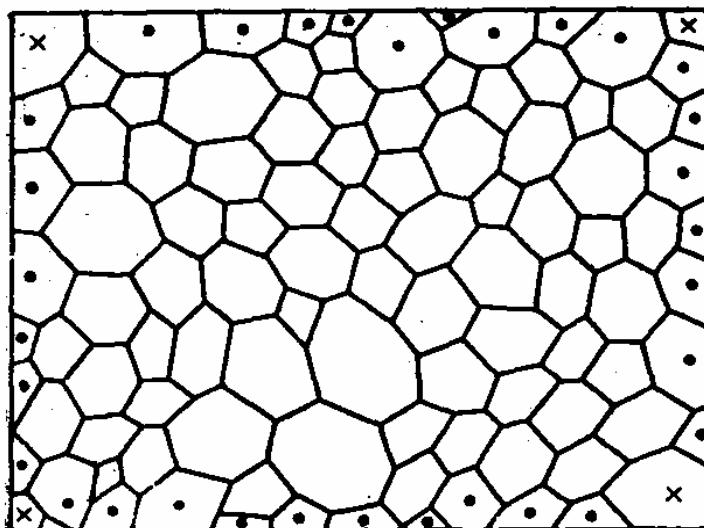


Рис. 1.5. Принцип определения средней площади зерна
в однофазной полигонической структуре

Наиболее точные результаты получают в том случае, когда внутри поля зрения находится от 10 до 20 сечений исследуемой структурной составляющей. Для получения достоверной средней величины,

характеризующей всю поверхность шлифа, нужно измерить 10 – 20 полей зрения, равномерно распределенных по всей поверхности шлифа. В большинстве случаев достигается точность, удовлетворяющая практическим требованиям, если измерено 200 – 250 микрочастиц.

3. Точечный метод. Предложен А.А. Глаголевым, используется для определения объемных долей структурных составляющих или фаз. На исследуемую структуру накладывается сетка. Подсчитывается число точек, лежащих в сечении микрочастиц исследуемой фазы (рис. 1.6). Объемная доля β -фазы определяется как $V_\beta = (m_i/z)100\%$, где m_i – число точек, попавших на частицы β -фазы; z – общее число точек в сетке.

Увеличение нужно выбирать таким образом, чтобы исследуемые структурные составляющие были достаточно большими для точного определения: попала ли точка в сечение фазы или нет. Расстояние между точками в сетке должно быть таким, чтобы не больше одной точки попало в сечение исследуемой микрочастицы.

Точность определения зависит от общего числа z подсчитанных точек и площади, занимаемой частицами дисперсной фазы на изображении. Абсолютное значение ошибки измерения ϵ определяется как

$$\epsilon = t \sqrt{V_\beta(100 - V_\beta)/p}.$$

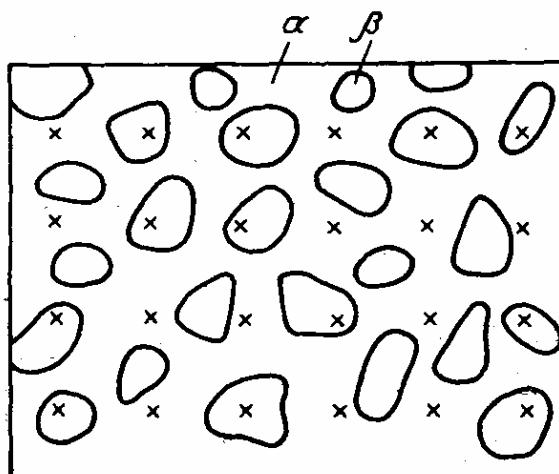


Рис. 1.6. Принцип точечного анализа
(x – перекрестья наложенной сетки)

Величина стандартного отклонения t определяется по заданной для результатов данного исследования доверительной вероятности P , табл. 1.2.

Таблица 1.2

**Связь между стандартным отклонением t
и доверительной вероятностью P результатов измерений**

P	t
0,50	0,6745
0,80	1,2816
0,90	1,6449

P	t
0,95	1,9600
0,98	2,3263
0,99	2,5758

4. Линейный анализ. Принцип этого метода состоит в том, что на изображение исследуемой структуры накладывается семейство измерительных прямых линий (заданной длины), после чего измеряются хорды, отсекаемые сечением зерен на этих линиях; подсчитывается число точек в пересечениях измерительных линий и границ зерен; определяется суммарная длина измерительных линий.

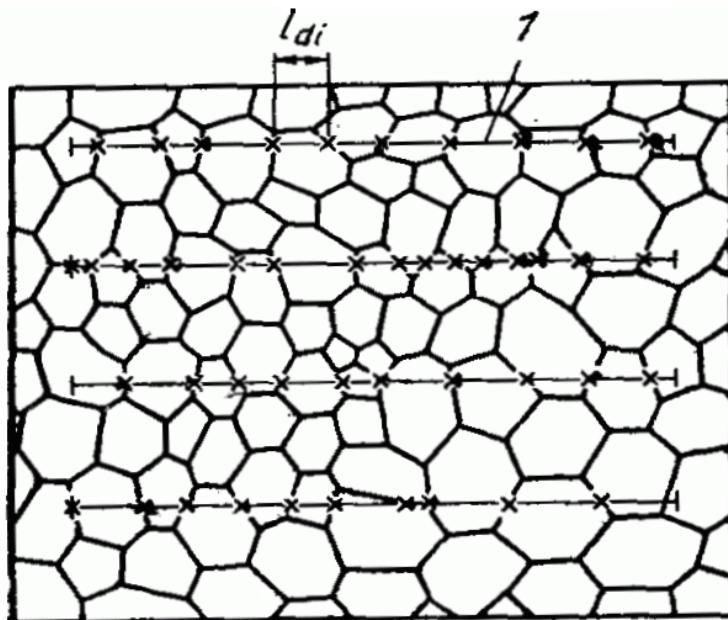


Рис.1.7. Принцип линейного анализа однофазно-полиэдрической структуры:
1 – измерительная линия, x – точки пересечения прямых линий с границами зерен

С помощью линий можно определить следующие параметры однофазно-полиэдрической структуры.

Средний линейный размер зерен, мкм,

$$\bar{D}_\alpha = L/N_{\alpha\alpha} M,$$

где L общая длина измерительных линий, мкм; $N_{\alpha\alpha}$ — число точек пересечения границ зерен с измерительными линиями; M — увеличение микроскопа.

Средний линейный размер зерна — это средняя длина хорды, которую образует измерительная линия в пределах сечения зерна. Следовательно, линейный размер зерна является двухмерной величиной и не имеет однозначной связи с объемной величиной зерна, например с диаметром зерна.

Удельная поверхность зерен $S_{\alpha\alpha}$ определяется как площадь поверхности (мм^2) зерен, приходящаяся на 1 мм^3 объема образца.

$$S_{\alpha\alpha} = 4N_{\alpha\alpha} M/L.$$

В отличие от среднего линейного размера зерна $S_{\alpha\alpha}$ представляет точную и для всех случаев представительную объемную характеристику структуры, следовательно, стереометрическую величину. Так как поверхности границ зерен являются местами повышенной концентрации дефектов и оказывают большое влияние на процессы диффузии и выделения, на процессы упрочнения и разупрочнения, а также на коррозионные процессы в твердых телах, удельная поверхность границ зерен представляет собой физически обоснованную характеристику размера зерна. Между этими структурными параметрами существует зависимость $S_{\alpha\alpha} = 4D_\alpha$.

5. Использование линейного анализа для матричной структуры.

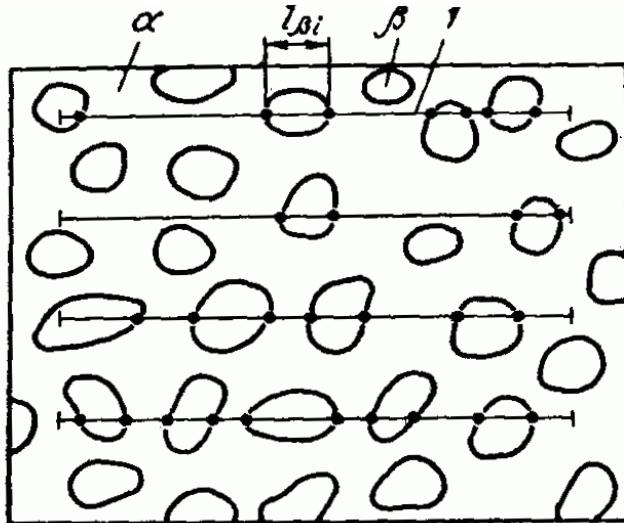


Рис. 1.8. Принцип линейного анализа матричной структуры:
1 – измерительная линия, x – точки пересечения прямых линий с границами фаз

В этом случае определяются:

- длины хорд $l_\alpha, l_\beta \dots$, которые определяют на измерительных линиях сечения частиц различных фаз;
- количество $N_{\alpha\beta}$ точек пересечения измерительных линий с границами фаз α и β ;
- суммарная длина всех измерительных линий L .

По этим данным можно рассчитать следующие параметры структуры:

Объемная доля распределенной в матрице β -фазы, %,

$$V_\beta = (L_\beta / L) \cdot 100 \%.$$

$$L_\beta = \sum_{i=1}^{m_\beta} l_{\beta i},$$

где L_β – сумма всех длин хорд в β -фазе, мкм; m_β – число хорд в β -фазе.

Средний линейный размер частиц β -фазы, мкм,

$$\bar{D}_\beta = L_\beta \sqrt{\frac{1}{2} N_{\alpha\beta} M} = 2L_\beta / N_{\alpha\beta} M.$$

6. Анализ многофазно-полиэдрической структуры. Эти формулы легко видоизменить для такого типа структуры. Например, средний линейный

размер частиц β -фазы определяется по той же формуле, что и в случае матричной структуры, а средний линейный размер зерна α -фазы, мкм:

$$\bar{D}_\alpha = \left(V_\alpha / 100 \right) L / \left(N_{\alpha\alpha} + \frac{1}{2} N_{\alpha\beta} \right) M.$$

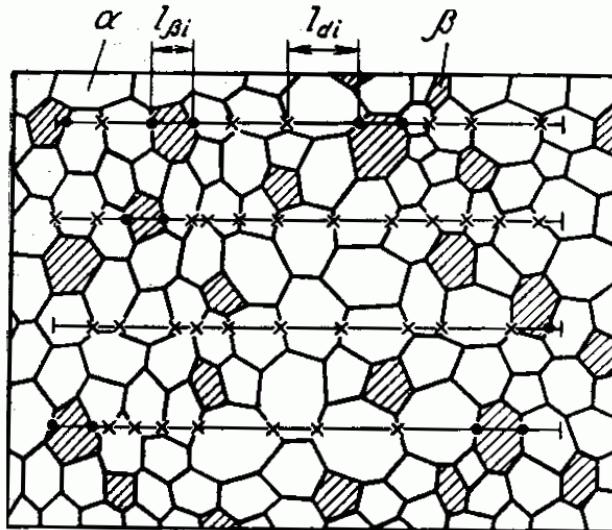


Рис. 1.9. Принцип линейного анализа многофазной полиэдрической структуры

7. Анализ ориентированной структуры. При его проведении на изображение накладываются две группы измерительных линий - параллельно и перпендикулярно ориентации структуры и для описания структуры приводятся два линейных параметра.

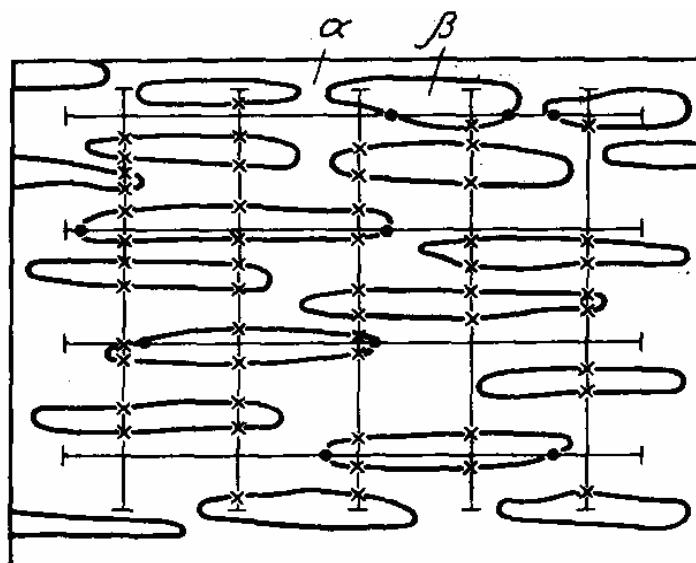


Рис. 1.10. Принцип линейного анализа ориентированной структуры

Рекомендации по выполнению линейного анализа.

В металлографической практике на исследуемую структуру обычно накладываются параллельные линии одинаковой длины. Увеличение следует выбирать так, чтобы по длине одной линии располагалось примерно 20 зерен (длина измерительной линии примерно соответствует диаметру поля зрения). Расстояние между линиями должно примерно соответствовать диаметру максимального сечения исследуемой структурной составляющей, находящейся на изображении шлифа, во избежание двойного подсчета точек.

При определении объемной доли можно рассчитать абсолютную ошибку измерения ε по формуле

$$\varepsilon = Kt \sqrt{V_\beta (100 - V_\beta) / m_\beta}.$$

Стандартное отклонение t определяется так же, как в точечном методе (табл. 1.2). Коэффициент K для полиэдрической (изотропной) структуры составляет 0,65; для ориентированной структуры значения K различаются вдоль (0,85) и поперек (0,34) ориентации структурных составляющих.

1.2.3. Фрактальный анализ в металловедении

Традиционные методы геометрической оценки формы различных предметов, в том числе и в материаловедении, основаны на приближенной аппроксимации структуры исследуемого объекта геометрическими фигурами, например линиями, отрезками, плоскостями, многоугольниками, многогранниками, сферами. Все эти приемы основываются на классической евклидовой геометрии с целой топологической размерностью.

Новые представления о форме реальных объектов природы, о структурах в биологии и материаловедении основаны на понятии фракталов, которое впервые сформулировал Б. Мандельброт. Он ввел понятие не только фрактала, но и фрактальной геометрии, отличающейся от евклидовой дробными размерностями, и обратил внимание на то, что контуры,

поверхности и объемы окружающих нас предметов не так ровны, гладки и совершенны, как принято думать.

Для количественной оценки этих отклонений от идеальности (извилистости контура, морщинистости поверхности, системы трещин в объеме образца или пористости объема) Б. Мандельброт применил математический аппарат, разработанный в начале XX в. Ф. Хаусдорфом (1868 – 1942) и А. С. Безековичем (1891 – 1970). Эта новая количественная оценка – через дробную размерность Хаусдорфа – Безековича применительно к идеальным объектам классической евклидовой геометрии давала те же численные значения, что и известная топологическая размерность (равна нулю для точки, единице – для плавной линии, двум – для фигуры и поверхности, трем – для тела и пространства). Но в случае оценки морфологии реальных структур новая размерность обладала более тонкой чувствительностью ко всякого рода несовершенствам реальных объектов. Так, отрезок прямой, отрезок синусоиды и самая сложная кривая неразличимы при использовании топологической размерности – все они имеют размерность, равную единице, тогда как их размерность по масштабной шкале Хаусдорфа – Безековича различна и позволяет числом измерять степень извилистости линии. Размерность Хаусдорфа – Безековича увеличивается по мере возрастания извилистости линии или шероховатости поверхности.

Для математиков фракталы – это объекты с дробной (фрактальной) размерностью, для физиков – это объекты, характеризующиеся само-подобием в широком интервале масштабов (все эти фигуры подобны любому своему фрагменту). Материаловед должен видеть во фрактальности возможность количественной оценки реальной структуры материалов.

Многие природные фракталы (поверхности разлома горных пород и металлов, облака, молнии, турбулентные потоки, пена, гели, частицы сажи и т.д.) на первый взгляд лишены явного геометрического подобия, но упорно воспроизводят в каждом фрагменте статистические свойства целого. Такое

статистическое подобие, или самоподобие в среднем выделяет фракталы среди множества природных объектов.

Фрактальные фигуры часто носят поэтические названия: «Канторова пыль», «кривая Пеано», «снежинка фон Коха», «ковер Серпинского» и т.д.

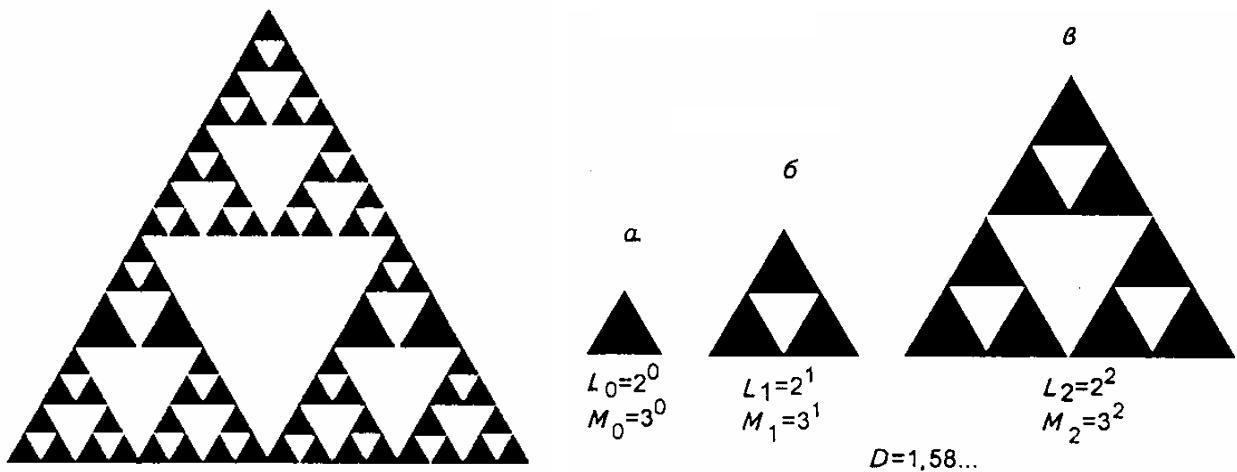


Рис. 1.11. Треугольный «ковер Серпинского» и шаги (итерации) (*a*, *b*, *c*) в его построении

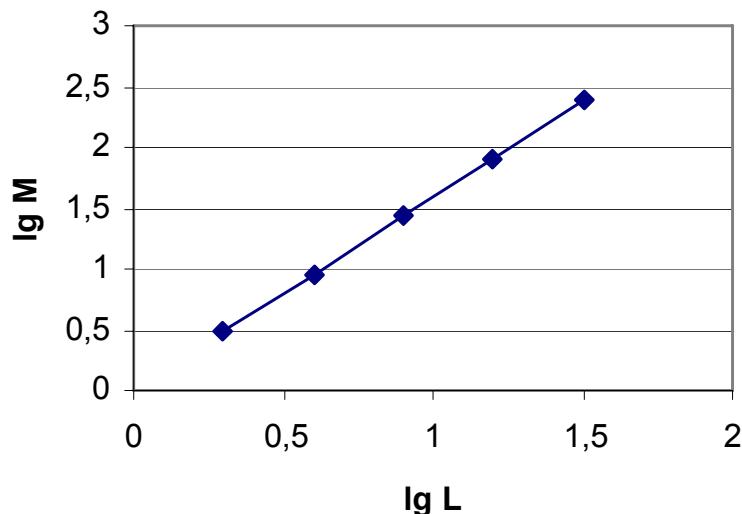


Рис. 1.12. Определение фрактальной размерности D для «ковра Серпинского»: $\tan \alpha = (\lg 3)/(\lg 2) = 1,58\dots$

Примером фрактала, созданного человеком, является мозаика на полу церкви в городке Анагни (Италия, 1104 г.) Эта фигура широко известна как «ковер Серпинского» (рис. 1.11). Польский математик В. Серпинский, живший в начале XX в., вероятно был одним из первых, кто обратил внимание на такого типа фигуры и осознал, что имеет дело с геометрической

фигурой с дробной размерностью. В «ковре Серпинского» элементарными блоками служат треугольники с единичной массой ($M_0 = 1$) и единичной длиной стороны ($L_0 = 1$) (рис. 1.11,*a*). На первом шаге три элементарных блока (треугольника) соединяются так, чтобы получить новый треугольник с увеличенной втрое массой ($M_1 = 3^1$) и длиной стороны, увеличенной в два раза ($L_1 = 2$). На третьем шаге (рис. 1.11,*в*) образуется фрагмент, рисунок которого повторяет фрагмент церковной мозаики в Анагни ($M_3 = 3^2$; $L_3 = 2^2$). Этот процесс может продолжаться до бесконечности, но важно, что теперь появилась возможность построить график (рис. 1.12) зависимости логарифма массы от логарифма размера и вычислить фрактальную размерность D , которая для «ковра Серпинского» равна 1,58. Физический смысл этого состоит в том, что «ковер Серпинского» заполняет пространство промежуточным образом, т.е. плотнее, чем совокупность отрезков, имеющих размерность $D = 1$, но менее плотно, чем целый треугольник ($D = 2$).

Аналогичным образом вычисляется фрактальная размерность снежинки фон Коха, являющейся самоподобным объектом. Размерность снежинки находится в интервале между 1 и 2, свидетельствуя о том, что данный объект уже не обычная кривая, но и не плоскость (рис. 1.13).

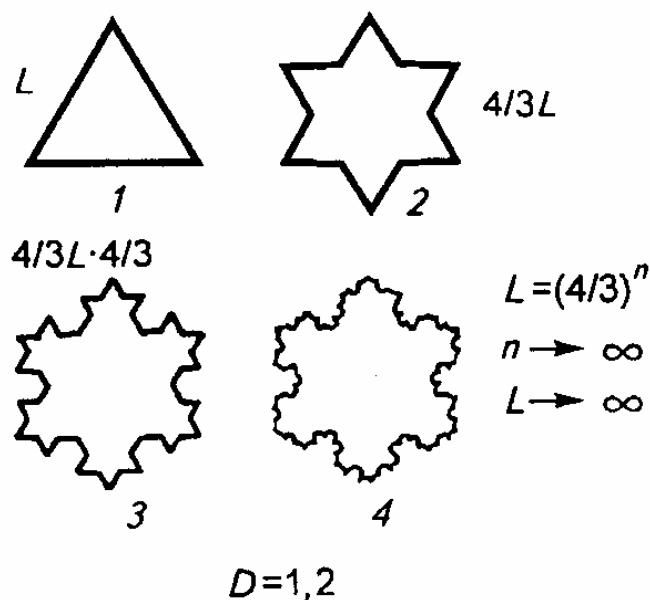


Рис. 1.13. Снежинка фон Коха: представлены первые четыре шага в ее построении. L – длина побережья, по мере построения $L \rightarrow \infty$; площадь конечна. D – фрактальная размерность

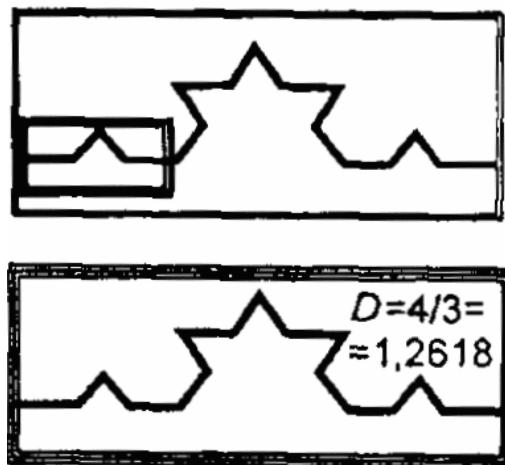


Рис.1.14. Самоповторяющийся элемент при построении снежинки фон Коха

Реальная снежинка представляет собой дендритный кристалл льда (рис. 1.15). Ее довольно сложно аналитически описать в рамках традиционной евклидовой геометрии. В то же время для описания снежинки с помощью фрактальной геометрии потребуются всего лишь три параметра: фрактальная размерность D , размеры первичного блока (R_{\min}) и снежинки в целом (R_{\max}). На начальном этапе построения она составляет 1,2. По мере роста извилистости контура размерность возрастает до $D = 1,71$, именно эту размерность имеет реальная снежинка.



Рис. 1.15. Снежинка, построенная с помощью компьютера.