

МИНИСТЕРСТВО ОБЩЕГО И ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИМ. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО

Физический факультет

Кафедра физического материаловедения

## **МИКРОСТРУКТУРЫ СЛАЗОВ**

Учебное пособие

Нижний Новгород  
2005



**Микроструктуры сплавов:** Учебное пособие. Пер. с англ. — Н. Новгород: Издательство ННГУ, 2005. — 20 с.

Перевод с английского А.В. Чувильдеевой

Под редакцией В.Н. Чувильдеева

В работе приведено описание так называемой "микроструктуры" — структурного уровня материалов, находящегося "между" уровнем "фаз" и уровнем "макроструктуры". В качестве элементов микроструктуры избраны дефекты решетки от нуля- до трехмерных. Эти элементы характеризуются плотностью и параметрами распределения в пространстве поликристалла. Три элемента типа двухфазных микроструктур (дисперсная, скелетонная, дуговая) описаны с использованием таких топологических параметров, как плотности границ зерен и границ разделов фаз, а также параметров, описывающих перколяционное поведение фаз и границ. Такой подход может быть распространен на n-фазные микроструктуры. Комбинированные микроструктуры описаны как смеси микроструктурных элементов и типов микроструктур. По аналогии с трансформациями, возможными на других структурных уровнях (электронном, фазовом) описаны микроструктурные трансформации. Это трансформации одних микроструктурных элементов в другие (дислокации → границы зерен), дефектных кристаллических решеток (микроструктур) в аморфную фазу (без микроструктур), или превращения одного типа двухфазной микроструктуры в другой. Такие микроструктурные трансформации могут быть использованы для объяснения широты пределов, в которых наблюдаются изменения свойств материалов.

Учебное пособие предназначено для студентов, специализирующихся в области физического материаловедения и представляет собой авторизованный перевод статьи E. Nimbogen "On the Microstructure of Alloys". Acta Metall. Vol. 32, No. 5, pp. 615-627, 1984.

Ил. 9. Табл. 5. Библиографический список: 24. Бесплатно.

## 1. Введение

Одной из задач материаловедения является установление связи между *структурой* и макроскопическими свойствами вещества. Вопрос о том, что следует понимать под термином "структура", оказывается довольно сложным. Обычно при описании физических объектов выделяют 7 структурных уровней (см. табл.1). На первом уровне структуры стоят элементарные частицы, на втором — макроскопические инженерные структуры. Здесь нас будет интересовать шестой структурный уровень, называемый обычно микроструктурным уровнем или микроструктурой. До недавнего времени уровень микроструктуры не изучался так серьезно, как другие уровни. Однако теперь стало ясно и его существование, и важность при описании свойств материалов.

Следует заметить, что термин "микроструктура" давно применяется при описании объектов, которые видны при использовании световой микроскопии. Здесь их описание достигло высокой степени качества [1, 2]. В последние годы успехи электронной микроскопии (ПЭМ, РЭМ) [3] существенно расширили возможности в описании и понимании микроструктуры, и стало ясно, что ее значение при описании поведения материалов сопоставимо со значением остальных уровней структуры.

Как видно из таблицы 1, объекты на различных структурных уровнях охватывают определенный диапазон линейных размеров, причем очень часто эти диапазоны перекрываются. Определим границы уровня микроструктуры. Наибольшие трудности возникают при определении нижней границы — границы между уровнем микроструктуры и уровнем фазы. (В первом приближении фазы — это трехмерные области однородного атомного строения кристалла или стекла.) Минимальные размеры микроструктурного элемента могут лежать в диапазоне атомных размеров (например, толщина границы зерна). В этом случае размер микроструктурного элемента на кристалле может превосходить размер микроструктурного элемента на порошке. Таким образом, размер ячейки не может использоваться для определения "границы" между структурным уровнем фазы и уровнем микроструктуры. В отличие от фазы, микроструктура включает в себя и все неоднородности внутри фаз и между фазами. (В практических случаях строение фаз отвечает условиям их стабильного или метастабильного термодинамического равновесия. Элементы микроструктуры выявляют неравновесные особенности ее строения. Это дает еще один подход к выявлению "границы" между уровнем фазы и уровнем микроструктуры [4].) Согласно общему подходу, дефекты кристаллического строения рассматриваются как часть микроструктуры [5]. При их описании обычно не требуется минимизировать величину свободной энергии. Даже в предельном случае границы раздела в бикристалле граница должна рассматриваться как часть микроструктуры, так как отсутствуют экспериментальные факты, свидетельствующие о том, что бикристалл и его граница раздела могут образовывать систему с минимумом свободной энергии.



С этих позиций микроструктура может быть охарактеризована расположением в трехмерном пространстве всех типов неравновесных дефектов, включая границы и поры.

Таким образом, однофазные материалы могут иметь микроструктуру, а многофазные должны её иметь.

Таблица 1. Семь уровней микроструктуры.

| Обозначение уровня | Номер уровня | Структурный уровень  | Размер структурных объектов |
|--------------------|--------------|----------------------|-----------------------------|
| Г                  | 7            | Инженерные структуры | $10^8 - 10^4$ м             |
| Ф                  | 6            | Микроструктура       | $10^{10} - 10^0$ м          |
| М                  | 5            | Фаза                 | $10^{-10} - 10^{-7}$ м      |
| А                  | 4            | Молекула             | $10^{-10} - 10^{-3}$ м      |
| А                  | 3            | Атом                 | $10^{-10}$ м                |
| Н                  | 2            | Ядро                 | $10^{-13}$ м                |
| Е                  | 1            | Элементарная частица | $10^{-15}$ м                |

## 2. Микроструктурные элементы и типы двухфазных структур

Основные элементы микроструктуры — это дефекты решетки и внутренние поверхности раздела. Их можно систематизировать по размерности (табл. 2). Количественное описание элементов микроструктуры нужно начать с описания строения дефектов и определения их плотности. Плотность дефектов зависит от их размерности:

$$\text{нульмерные дефекты: } \rho_0 = \rho_v = \Sigma N/V = [m^{-3}], \quad (1a)$$

$$\text{одномерные дефекты: } \rho_1 = \rho_d = \Sigma L/V = [m^{-2}], \quad (1b)$$

$$\text{двумерные дефекты: } \rho_2 = \rho_b = \Sigma A/V = [m^{-1}], \quad (1c)$$

$$\text{трехмерные дефекты: } \rho_3 = \rho_p = \Sigma V/V = [m^0]. \quad (1d)$$

Нижние индексы обозначают размерность дефекта, т.е.  $v$  — вакансия,  $d$  — дислокация,  $b$  — граница,  $p$  — пора. Формулы (2a–2d) дают соотношения между плотностью  $\rho$  и средним расстоянием  $S$  между дефектами:

$$S_v \approx \rho_v^{-1/3} = [m], \quad (2a)$$

$$S_d \approx \rho_d^{-1/2} = [m], \quad (2b)$$

$$S_b \approx \rho_b^{-1} = [m], \quad (2c)$$

$$S_p \approx f_p^{1/3} d_p = [m]. \quad (2d)$$

Таблица 2. Микроструктурные элементы.

| Обозначение уровня | Геометрическое измерение | Примеры элементов | Размерность плотности $\rho$ | Удельная энергия |
|--------------------|--------------------------|-------------------|------------------------------|------------------|
| 1                  | 0                        | Вакансии          | $m^{-3}$                     | Дж $m^{-1}$      |
| 2                  | 1                        | Дислокации        | $m^{-2}$                     | Дж $m^{-2}$      |
| 3                  | 2                        | Границы зёрен     | $m^{-1}$                     | Дж $m^{-1}$      |
| 4                  | 3                        | Поры              | $m^0$                        | Дж $m^{-3}$      |

<sup>1</sup> Здесь и далее условные обозначения см. табл. 5.

В дополнение к характерным размерам, геометрическим и статистическим функциям распределения фаз существуют и другие параметры, используемые при описании микроструктуры, которые не будут здесь упоминаться [1, 2]:

- распределение ориентаций кристаллитов (текстура);
- локальное упорядочение (случайное, регулярное, кластерное);
- форма одно-, дву- и трехмерных элементов;
- ориентация элементов в пространстве (микроструктурная анизотропия).

В двухфазном материале в зависимости от объема, строения и расположения  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз можно выделить несколько типов микроструктур. В данной работе обсуждение будет ограничено в основном изотропными микроструктурами, которые состоят из одинаковых зёрен и частиц. Для описания таких структур полезно рассмотреть плотность границ  $\rho_b$ , включающей плотность границ раздела фаз и границ зёрен (рис. 1–3, табл. 3):

$$\rho_b = \rho_{\beta\beta} + \rho_{\alpha\alpha} + \rho_{\alpha\beta}. \quad (3a)$$

Например, в случае дисперсно упрочненной микроструктуры не должно существовать  $\beta\beta$  границ.

$$\rho_{\beta\beta} = 0. \quad (3b)$$

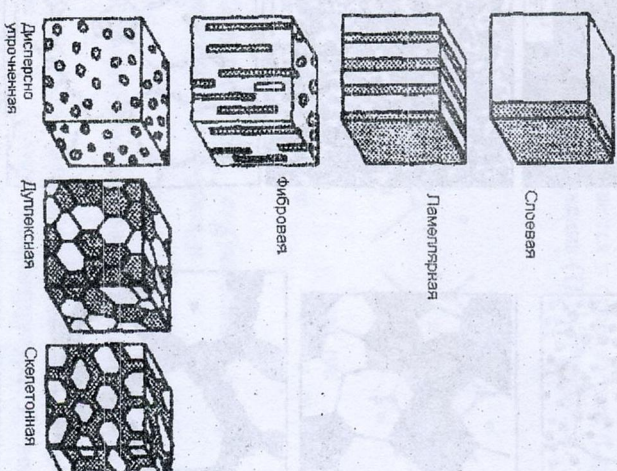


Рисунок 1. Типы двухфазной микроструктуры.

Плотность поверхностей раздела фаз  $\rho_{\alpha\beta}$  связана с уровнем дисперсности  $f_\beta$   $d_\beta$ . Например, для частиц кубической формы из уравнения (2d) следует:

$$\rho_{\alpha\beta} = 6f_\beta d_\beta^{-1}, \quad (3c)$$

$$(0 < f_\beta < 1 \text{ и } d_\beta > 2a).$$



Иногда оказывается полезно связать  $R_{\beta\beta}$  с параметрами структуры матрицы, используя отношение  $\delta$  плотностей границ:

$$\delta = R_{\alpha\beta} R_{\alpha\alpha} \quad (3d)$$

С этой точки зрения материал с полностью дисперсной  $\beta$ -фазой определяется как материал с  $\delta > 1$ . Если  $\beta$ -частицы выделяются на границе  $\alpha\alpha$ -зёрен и в конечном итоге занимают их полностью, то в этом случае начинают формироваться  $\beta\beta$ -границы, а  $\alpha\alpha$ -границы могут исчезнуть. Тогда  $R_{\alpha\alpha} = 0$ . (3e)

При наличии дисперсии частиц  $\beta$ -фазы в  $\alpha$ -матрице говорят, что  $\alpha$ -фаза перколирует сечение макроскопического образца. Наоборот, если  $\alpha$ -частицы находятся в  $\beta$ -матрице, говорят о перколяции  $\beta$ -фазы (рис. 2). Термин "перколяция" для аналогичных случаев был рассмотрен в [6, 7].

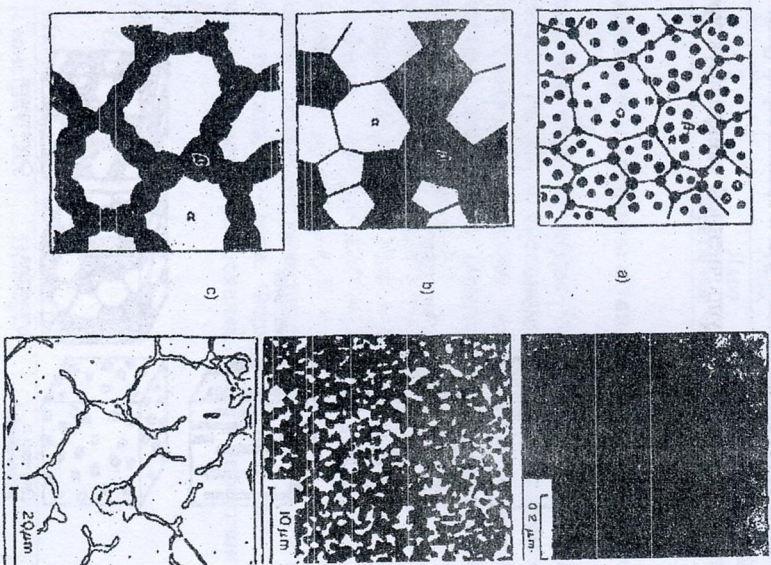


Рисунок 2. Типы двухфазной микроструктуры: а) дисперсно упрочненная; Ni+18,2Cr+5,7Al,  $\gamma+\gamma'$ ; б) дуэлексная: Fe+9вес.%Ni,  $\alpha+[ \gamma \rightarrow \alpha_1 ]$  (дустенит, трансформировавшийся в мартенсит в процессе охлаждения); в) скелетонная: Fe+0,0вес.%C,  $\alpha+Fe_3C$ .

Третий тип двухфазной микроструктуры характеризуется *перколяцией*  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз. Эта структура содержит одинаковое количество  $\alpha$ - и  $\beta$ -зёрен одинакового размера (рис. 2 и 3). В этой структуре оба типа границ зёрен и поверхностей раздела фаз реализуются с одинаковой вероятностью: в среднем семь межфазных поверхностей раздела и семь границ зёрен окружают каждое зерно.

$$R_{\beta\beta} = R_{\alpha\alpha} \quad (4a)$$

$$R_{\beta\beta} + R_{\alpha\alpha} = R_{\alpha\beta} \quad (4b)$$

$$\delta = R_{\alpha\beta} R_{\alpha\alpha} = R_{\alpha\beta} R_{\beta\beta} = 2. \quad (4c)$$

Такое идеальное дуэлексное строение требует постоянного отношения объемных долей фаз

$$f_{\alpha} = f_{\beta} = 0,5. \quad (4d)$$

Средний размер зерна дуэлексной структуры  $S_b$  обратно пропорционален сумме плотностей всех зёрен (уравнение (2c)):

$$S_b \approx R_b^{-1} = (R_{\beta\beta} + R_{\alpha\alpha} + R_{\alpha\beta})^{-1}. \quad (4e)$$

Каждое  $\alpha$  или  $\beta$  зерно окружено в среднем 14 соседями. Вероятность того, что все они одинаковы ( $\alpha$  или  $\beta$ ) равна  $2^{-14}$ . Из этого следует перколяция  $\alpha$  и  $\beta$  в дуэлексной структуре (табл. 4). Топологический метод для определения типа двухфазной структуры, заключается в определении плотности тройных стыков ( $\alpha\alpha\alpha$ ,  $\alpha\alpha\beta$ ,  $\alpha\beta\beta$ ,  $\beta\beta\beta$ ) [9] (уравнения (1b), (2b), рис. 3).

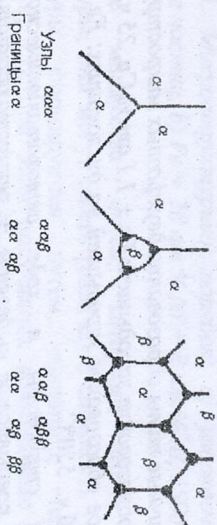


Рисунок 3. Схематическое изображение однофазной, дисперсно упрочненной и дуэлексной микроструктур.

### 3. Смеси микроструктурных элементов и типов микроструктур

Микроструктурными элементами бывают "замороженные" неравновесные дефекты. С этой точки зрения микроструктура  $\Gamma$  всегда связана с повышенной свободной энергией  $\Delta F_{\Gamma}$  материала. Вычисляется эта энергия из суммы произведений плотностей дефектов разной размерности  $\rho_i$  (нульмерные, одномерные и т.п.) на их свободную энергию  $\epsilon_i$  (табл. 2):

$$\Delta F_{\Gamma} = U_{\Gamma} - \Delta S_{\Gamma} T \approx \Delta U_{\Gamma} = \sum \rho_i \epsilon_i + \sum \rho_2 \epsilon_2 + \sum \rho_3 \epsilon_3. \quad (5a)$$

Эта энергия обеспечивает некоторые реакции, проходящие в твердом теле [10]. Величина  $\Delta F_{\Gamma}$  характеризует нестабильность микроструктуры [14] при условии, что структура состоит из термодинамически стабильных фаз  $\phi$ .



$$\Delta F_{\phi} = 0, \\ \Delta F_{\text{гомог}} = \Delta F_{\phi} + \Delta F_{\Gamma}$$

(5b)

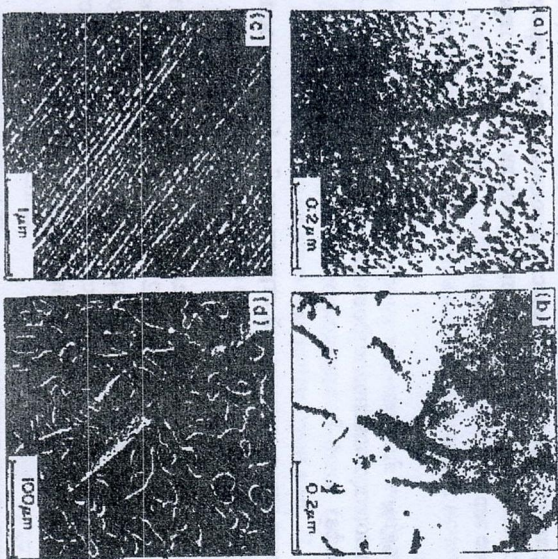


Рисунок 4. Различные типы образования двухфазных микроструктур.

a) Гомогенное образование зародышей: Fe + 1,1 ат. % Си, 25 ч., 500°C.

b) Темперогенное образование зародышей на дислокациях: Fe + 1,1 ат. % Си, 24 ч., 500°C, 10 ч., 550°C.

c) Получение структуры в ходе автокаталитической реакции (комбинированное превращение + рекристаллизация): Си + 2,8 ат. % Со.

d) Искусственное формирование пропиткой: металлургическое стекло Fe+20 ат. % В, в оксидной смоле, поверхность разрушена.

Таким образом, основной особенностью микроструктурного уровня является отсутствие термодинамического равновесия. Поэтому существует множество путей, обеспечивающих энергией формирование микроструктуры. Для примера, формирование двухфазной структуры может происходить в ходе следующих процессов (рис. 4):

- (1) гомогенное образование зародышей в матрице,
- (2) гетерогенное образование зародышей (контролируемое дефектами),
- (3) автокаталитический рост (эвтектика, эвтектоидный рост),
- (4) "синтез" (композиция, спеченные смеси различных порошков и другие).

В связи с этим необходимо упомянуть о микроструктурном упорядочении, которое проявляется в дифракционных эффектах [11-13]. Наличие микроструктурного порядка может быть охарактеризовано уменьшением

микроструктурной энтропии  $\Delta S_{\Gamma}$  по сравнению с энтропией, соответствующей случайной микроструктуре (рис. 5). Появление микроструктурного порядка может быть обусловлено:

- (A) минимизацией энергии ( $\Delta U_{\Gamma} \rightarrow \text{мин.}$ ),
- (B) ростом диссипации,
- (C) искусственным происхождением.

Возникновение порядка управляется или стремлением системы к термодинамическому равновесию (A), или кинетикой необратимых процессов (B), или человеком с помощью интеллект (C) [13].

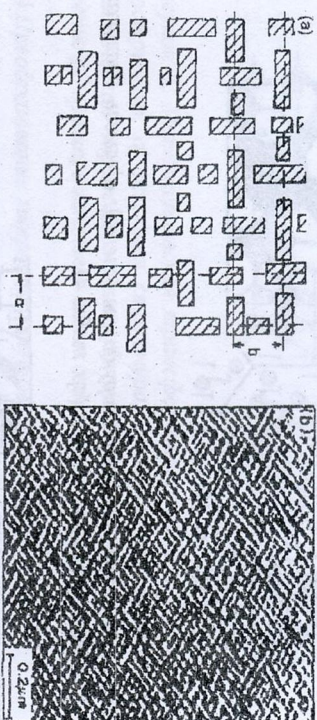


Рисунок 5. Микроструктурный порядок: a) упорядоченное локальное распределение частиц; b) Fe + 28 ат. % Ni + 1 ат. % Al, 1500 ч., 400°C,  $\gamma+\gamma'$ .

Вследствие множества путей, которыми могут формироваться микроструктуры, они могут иметь различную сложность [14]. На практике микроструктуры формируются путем, например, термомеханической обработки [10, 15], при этом получают комплексные микроструктуры, имеющие желаемые макроскопические структурно-чувствительные свойства, например, высокие механические или магнитные показатели.

При анализе таких комплексных микроструктур необходимо рассматривать смеси микроструктурных элементов и различных типов микроструктур (рис. 6). Определяется объемная доля различных фаз в смеси:

$$f_{\alpha} + f_{\beta} + \dots = 1, \quad (6a)$$

а затем анализируются природа и плотность нуль-трехмерных дефектов в различных фазах  $\alpha$  и  $\beta$

$$(\sum \rho_{\alpha} + \sum \rho_{\beta} + \sum \rho_{\alpha} + \sum \rho_{\beta} + \sum \rho_{\alpha} + \sum \rho_{\beta})_{\beta} + \dots \quad (6b)$$

Наконец, изучается природа поверхностей раздела (табл. 3), а отношение их удельных плотностей (уравнение (3d)) обеспечивает полное описание даже наиболее сложных микроструктур, которые состоят как из смеси микроструктурных элементов, так и смесей типов микроструктур (рис. 7).

Это, в свою очередь, может служить отправной точкой для вычисления макроскопических свойств. Например, микроструктурные элементы могут взаимодействовать с дислокациями.



Это взаимодействие является элементарным механизмом упрочнения, и таким образом предел текучести может быть вычислен даже для сплавов с очень сложной микроструктурой [16] (табл. 2).

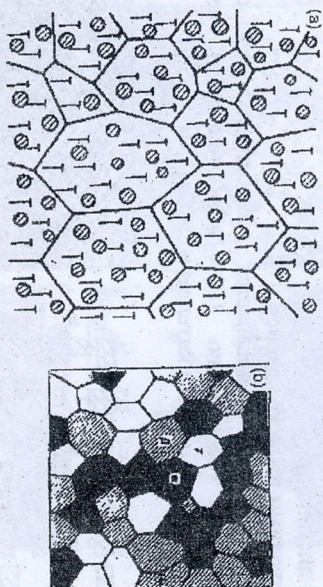


Рисунок 6. Комплексные микроструктуры (схема): а) смесь дислокаций и частиц; б) триаглексная структура (ср. табл. 4).

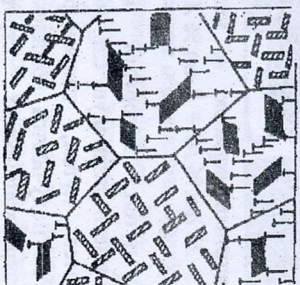


Рисунок 7. Смесь микроструктурных элементов и типичная микроструктура [дислокации, границы, частицы] + [дисперсно-упрочненная, дуликсная структура], схема.

#### 4. Трансформация микроструктуры

Трансформации (дискретные или непрерывные) — это преобразование структуры материала. Преобразования могут происходить на всех уровнях структуры (табл. 1). Возможны электронная трансформация и трансформация частиц, а также изменения фаз в кристаллах. В электронной подсистеме структура  $\alpha$  трансформируется в структуру  $\beta$ :

$$\phi_{\alpha} \rightarrow \phi_{\beta} \quad (7a)$$

Например, переход парамагнетик-ферромагнетик, или проводник-сверхпроводник — это электронная трансформация, при этом изменения в структуре фазы вторичны [17, 18]. Концепция трансформации может быть применена и к уровню микроструктуры ( $I_1$ ), например, в случае перехода одной двухфазной микроструктуры в другую (рис. 8) [19]:

$$I_x \rightarrow I_y \quad (7b)$$

Рассмотрим трансформации, где микроструктура играет важную роль.

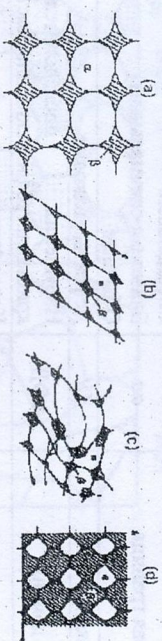


Рисунок 8. Математическая трансформация плоских сеток двухфазных микроструктур: а) исходная структура; б) аффинная трансформация; с) топологическая трансформация; д) микроструктурная трансформация: появление  $\beta\beta$ -границы в качестве новых элементов микроструктуры.

#### (A) Преобразование микроструктурных элементов

Как известно, вакансии могут преобразовываться в дислокационные петли; дислокации — в границы зёрен; когерентные границы — в некогерентные (табл. 3). Такая трансформация характеризуется тем, что элементы структуры превращаются в элементы более высокого геометрического порядка или в элементы с меньшей когерентностью.

Движущая сила такой трансформации — уменьшение полной энергии системы, в то время как энергия возникающего элемента  $e$ , как правило, увеличивается, а плотность трансформируемых элементов уменьшается (табл. 2, 3, 5).

$$v \rightarrow d \rightarrow b, \quad (7c)$$

$$v \text{ когерент.} \rightarrow v \text{ некогерент.} \rightarrow b \text{ некогерент.} \quad (7d)$$

#### (B) Преобразование микроструктуры в фазу.

$$(\phi_{\alpha} + I) \rightarrow \phi_{\beta} \quad (8a)$$

В некоторых случаях плотность микроструктурных элементов  $\rho$  может достигать значительных величин. Если, например, плотность дислокаций  $\rho_d$  или границ зёрен  $\rho_g$  (Уравнения (1b), (1c)) достигает значений, при которых состояние  $S_1$  (Уравнение (2)) становится порядка атомных, получается аморфная фаза ( $S_{\text{ам}} \approx 2a$ ). Прежде чем такое преобразование осуществится, обычно появляется ультрамелкая кристаллическая микроструктура.

Обычно трансформация идет за счет внешней энергии. Дислокации, например, возникают за счет влияния внешних напряжений [20]. Объем, занимаемый границами зёрен, не может быть игнорирован при плотности границ зёрен, достигшей значения, когда  $S < 1/10a$ . Для описания одно-



двухфазного материала должно быть добавлено уравнение (6b), где учтено, что дефекты занимают значительную долю полного объема [21].

$$f_a + f_{\infty} = 1, \quad (9a)$$

$$f_a + f_{\infty} + f_{\beta} + f_{\beta\beta} + f_{\beta\beta} = 1. \quad (9b)$$

Таблица 3. Двумерные элементы микроструктуры.

|                       |                |   |
|-----------------------|----------------|---|
| Малоголовая граница   | $\alpha\alpha$ | Построена из отдельных дислокаций                               |
| Высокоголовая граница | $\alpha\alpha$ | Специальные<br>Близкие к специальным<br>Обычные                 |
| Дефекты упаковки      | $\Delta U$     | Дефекты упаковки  |
| Антифазные домены     | АФД            | Нарушения последовательности<br>кристаллографических плоскостей |
| Поверхность раздела   | $\alpha\beta$  | Когерентные<br>Полукогерентные<br>Некогерентные                 |
| Свободные поверхности | $\alpha 0$     |   |

Трансформация называется полной, если аморфная фаза полностью замещает кристаллическую. Пример — скачкообразная трансформация кристаллических структур в стеклах (уравнение (8a)). Реакция, обратная описанной, дается уравнением

$$\phi_{\alpha} \rightarrow (\phi_{\alpha} + I). \quad (8b)$$

Это реакция кристаллизации из аморфной фазы. Микроструктура образуется из фазы  $\phi_{\alpha}$ , в которой микроструктура не существовало.

(С) Трансформация одного типа микроструктуры в другой.

Такая трансформация определяется появлением новых микроструктурных элементов как новых топологических параметров. Это явление заметно отличается от топологических преобразований геометрического строения, где особенности топологии сохранены (рис. 8). Двухфазные микроструктуры могут служить примером таких преобразований. В дополнение к объемной доле фаз для определения типа структуры должна быть использована плотность границ зерен (уравнения (3), (4), (9)). Трансформацию одного типа микроструктуры в другой связывают с появлением или исчезновением определенного типа границ (табл. 3, рис. 9), которые ведут себя как топологические особенности. Трансформация может быть рассмотрена и как функция изменения объемной доли фаз, их формы и ориентации. Для постоянных распределений по размерам и формам преобразование происходит при критической объемной доле фаз  $f_b$ , т.е. существует определенная связь между составом сплава, температурой отжига и диаграммой равновесия фаз. На рис. 9 дано двумерное представление следующих трансформаций:

$$\text{Дуплексная} \leftrightarrow \text{дисперсная: } I_2 \leftrightarrow I_3; \quad (10a)$$

$$\text{скелетонная} \leftrightarrow \text{дисперсная: } I_3 \leftrightarrow I_2. \quad (10b)$$

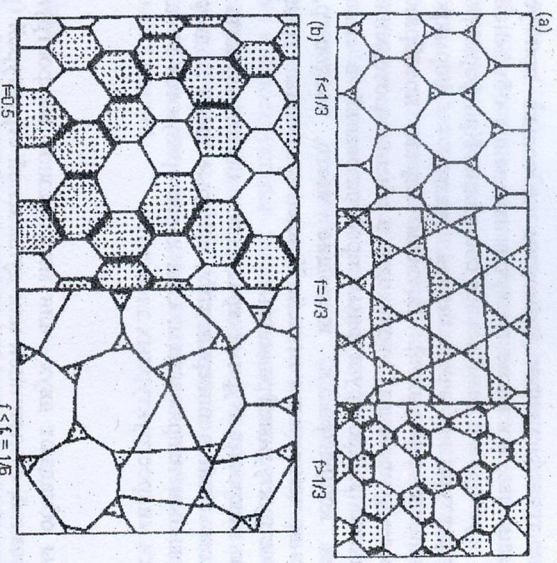


Рисунок 9. Трансформации типа микроструктуры (плоских сеток), схема. а) дисперсная → скелетонная; б) дуплексная → дисперсная.

Локальное распределение  $\beta$ -фазы и число кристаллитов на единицу площади (объема) в случаях, показанных на рис. 7, разное. Из этого следует, что критическая объемная доля фракции  $f_b$  при которой исчезают  $\beta\beta$ -границы, т.е. формируется дисперсная микроструктура, различна (уравнение (3b)). Значение объемной доли фракции, при которой происходит трансформация микроструктуры, может быть вычислено из геометрических и статистических функций микроструктуры.

Таким образом, трансформация, описываемая уравнением (10a), идентична переходу от перколяции только фазы  $\alpha$  к перколяции и  $\alpha$ , и  $\beta$ , которая трансформируется в соответствии с уравнением (10b) в перколяцию  $\alpha$  в  $\beta$  (табл. 4). Это расщепление в предельном переходе приводит к изотропной микроструктуре, состоящей из равноосных зерен. В случае анизотропной микроструктуры можно говорить о различных в объемных долях фракций  $f$  в различных направлениях (рис. 1).

Таблица 4. Перколяция в  $\alpha$ -зеренной структуре.

| Тип         | 1 фаза   | 2 фазы        | 3 фазы                   |
|-------------|----------|---------------|--------------------------|
| Помогенная  | $\alpha$ | -             | -                        |
| Дисперсная  | -        | $\alpha$      | $\alpha$                 |
| Скелетонная | -        | $\beta$       | $\beta\alpha$            |
| Дуплексная  | -        | $\alpha\beta$ | $\alpha\beta\alpha$      |
| Триплексная | -        | -             | $\alpha\beta\alpha\beta$ |



Микроструктурные трансформации возможны не только при условии равновесного состояния фаз, но также в случае изменения объёмной доли после измельчения с переходом в равновесное состояние. При формировании дуплексной микроструктуры обычно первая стадия — формирование беспорядочно рассеянных зародышей. В этом случае преобразование структур "дисперсная → дуплексная" происходит в течение изотермического отжига. Другая причина микроструктурных преобразований в сплавах — градиенты объёмной концентрации, имеющие место, например, при обезуглероживании или цементации сталей. Концентрационные градиенты могут изменять микроструктурные градиенты.

Другим примером микроструктурных градиентов может служить изменение плотности дислокаций в поверхностях, которые были подвергнуты frictionным касательным напряжениям. Они характеризуются локальным изменением плотности микроструктурных элементов

$$\frac{d\rho_i}{dr} = \text{grad} \Gamma \quad (11a)$$

Многие материалы обладают двух- или многофазной микроструктурой (т.е. обладают двухфазной, скелетонной или дуплексной структурой (рис. 2, 3, уравнения (3))). Их объёмные свойства зависят от свойств микроструктурных элементов ("частичные" свойства  $\rho_i$ ), объёмной доли фаз  $f_i$  и типа микроструктуры.

Существуют три принципиально разных типа соотношений между объёмными свойствами, объёмом фаз, свойствами частиц и др., обуславливающих тип микроструктуры [22]. Каждое из "частичных" свойств связано с объёмной долей соотношениями, называемыми *правилами смесей*:

$$\rho_{ii} = \bar{\rho}_a f_a + \bar{\rho}_b f_b, \quad (12a)$$

$$\rho_{i1} = \frac{\bar{\rho}_a \bar{\rho}_b}{\bar{\rho}_a f_a + \bar{\rho}_b f_b}. \quad (12b)$$

Для одного микроструктурного компонента

$$\rho_{ii} = \rho_a f_a, \quad (13a)$$

$$\rho_{i1} = \bar{\rho}_a f_a. \quad (13b)$$

Для случая, когда свойства одной частицы ответственны за объёмные свойства

$$\rho_{ii} = \bar{\rho}_a, \quad (14a)$$

$$\rho_{i1} = \bar{\rho}_a. \quad (14b)$$

Иногда, в дополнение к свойствам фаз, должны быть учтены свойства их границ зерен и поверхностей раздела  $\rho_{sz}$ ,  $\rho_{sz}^*$ ,  $\rho_{sp}$ .

Уравнение (12a), например, описывает электропроводность для дуплексного строения (перколяция  $\alpha$  и  $\beta$ , параллельное расположение токопроводящих путей), уравнение (13a) — удлинение и разрушение при крупной дисперсии с искажением матрицы и без искажений фазы (двухфазная сталь).

Уравнение (14a) объясняет напряжение разрушения скелетонной структуры, где трещина может проходить исключительно сквозь хрупкую фазу, формирующую сетку.

Рассмотренная здесь концепция позволяет описать сплавы и керамические материалы. Для полимерных материалов структурный уровень "молекулы" играет ключевую роль. Их цепная структура подразумевает существование дополнительных элементов (конфигурации и конформации цепей), которые требуют введения дополнительных понятий для полного описания микроструктуры (для этих материалов используется термин "морфология"). Концепция микроструктуры также должна быть расширена в случае бетона: здесь в дополнение к порам и трещинам в фазе цемента важную роль играют структурные градиенты [24]. Объединенное описание микроструктуры, которое включает эти два важных класса материалов, требует новых значительных усилий.

## 5. Выводы

Теория микроструктуры, полезная для материалововедения, должна отвечать следующим требованиям: она должна описывать все особенности поведения материалов, которые не описываются теориями, относящимися к другим структурным уровням; соответствовать реальным процессам, которые управляют поведением микроструктуры (например, реакциям в твердом теле); и быть пригодной для установления количественных соотношений между микроструктурой и структурно-чувствительными свойствами.

Теория, описывающая микроструктуру на языке дефектов решетки (уравнение (1), табл. 2), удовлетворяет этим требованиям. Например, дефекты ответственны за увеличение предела текучести сплавов, обеспечивая препятствия перемещению дислокаций.

Взаимодействие дефектов решетки позволяет описать механизмы упрочнения: примерами могут служить упрочнение точечными дефектами, дислокационное, зернограничное, упрочнение дисперсными частицами или порами [16]. На языке теории дефектов могут быть описаны и многие другие структурно-чувствительные свойства микроструктур.



Таблица 5 (А). Условные обозначения.

|                          |               |  |
|--------------------------|---------------|--|
| $A$                      | $m^2$         | Область микроструктурных элементов   |
| $a$                      | $m$           | Межатомное расстояние  |
| $d_a, d_s$               | $m$           | Размер поры, кластера, частицы   |
| $\delta$                 | 1             | Отношение плотности грани  |
| $\epsilon_1$             | (табл. 2)     | Специфическая энергия микроструктурных элементов                             |
| $\Delta F_1$             | Дж/моль       | Свободная энергия микроструктуры   |
| $\Delta F_0$             | Дж/моль       | Свободная энергия разницы между метастабильной и стабильной фазами           |
| $f_{\alpha}, f_{\beta}$  | 1             | Объёмная доля $\alpha$ - или $\beta$ -фазы                                   |
| $f_{\alpha\alpha}$       | 1             | Объёмная доля грани $\alpha\alpha$   |
| $f_{\alpha\beta}$        | 1             | Объёмная доля поверхности раздела $\alpha\beta$                              |
| $f_1$                    | 1             | Критическая объёмная доля фазы при микроструктурном преобразовании           |
| $L$                      | $m$           | Длина дислокации   |
| $N$                      | -             | Число точечных дефектов  |
| $P$                      | -             | Любое объёмное свойство  |
| $P_{1, P_{II}}$          | -             | Объёмное свойство, // или $\perp$ расположенное к микроструктурному элементу |
| $\bar{P}_{\alpha}$       | -             | "Частичное" свойство фазы $\alpha$   |
| $\bar{P}_{\alpha\alpha}$ | -             | "Частичное" свойство границы зерен $\alpha\alpha$                            |
| $P_{\alpha\beta}$        | -             | "Частичное" свойство межфазной поверхности $\alpha\beta$                     |
| $r$                      | $m$           | Координата для определения микроструктурного градиента                       |
| $\rho_1$                 | (табл. 1)     | Плотность любых микроструктурных элементов                                   |
| $S_1$                    | $m$           | Средний размер микроструктурного элемента                                    |
| $S_{min}$                | $m$           | Минимальный размер для трансформации в стекло                                |
| $\Delta S$               | Дж/(моль * К) | Энтропия микроструктуры  |
| $\Delta U_1$             | Дж/моль       | Энергия микроструктуры   |
| $V$                      | $m^3$         | Полный объём   |
| $V_p$                    | $m^3$         | Объём частицы или поры   |

Таблица 5 (В). Условные обозначения.

|                             |                      |
|-----------------------------|----------------------|
| $\alpha$                    | Аморфная фаза        |
| $\alpha^{\beta}, \beta$     | Кристаллическая фаза |
| $\alpha\alpha', \beta\beta$ | Граница зерен        |
| $\alpha\beta$               | Поверхность          |
| $\alpha\alpha\alpha$        | Линия стыка          |
| $\alpha\alpha\beta$         | Вакансия             |
| $\nu$                       | Дислокация           |
| $d$                         | Граница              |
| $b$                         | Пора, частица        |
| $p$                         | Любая фаза           |
| $\phi$                      | Любая микроструктура |
| $T$                         | Дисперсная           |
| $x$                         | Скелетонная          |
| $y$                         | Скелетонная          |
| $z$                         | Дуплексная           |

Литература

1. S.A. Saltykov, Stereometrische Metallographie (translated from Russian). VEB Dt. Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig (1974).
2. E.E. Underwood, Quantitative Stereology, Addison Wesley, Reading, MA (1970).
3. J.J. Hren, J.I. Goldstein and D.C. Joy (editors), Introduction to Analytical Electron Microscopy. Plenum Press, New York (1979).
4. E. Hornbogen, Pract. Metall. 5, 51 (1968).
5. A.E. Presland, in Mechanical Properties of Intermetallic Compounds, p. 211. Wiley, New York (1960).
6. J. Gurland, Trans. Am. Inst. M. Engrs. 212, 452 (1958).
7. J. Gurland, in Quantitative Metallography (edited by R.T. de Hoff and F.N. Rhines), p. 278. McGraw-Hill, New York (1968).
8. J. Gurland, Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Cong. Stereology (edited by H. Elias), p. 250. Springer, Berlin (1967).
9. C. S. Smith, Metall. Rev. 9, 1 (1964).
10. E. Hornbogen, Metall. Trans. 10A, 947 (1979).
11. V. Daniel and H. Lipson, Proc. Toy. Soc. 182, 378 (1943).
12. E. Hornbogen and M. Roth, Z. Metallk. 58, 842 (1967).
13. A. Segmüller, P. Krishna and L. Esaki, J. Appl. Crystallogr. 10, 1 (1977).
14. J.M. Martin and R. D. Doherty, Stability of Microstructure in Metallic Systems. Cambridge Univ. Press (1976).
15. E. Hornbogen, Z. Metallk. 64, 867 (1973).
16. E. Hornbogen, Proc. ICSSMA 5, Aachen, 2, 1337 (1979).
17. Phase Transformations Am. Soc. Metals, Metals Park, OH (1970).
18. Martensitic Transformation, Proc. Int. Summer Course (edited by L. Delaey). Leuven, Belgium (1982).
19. E. Hornbogen, Z. Metallk. 72, 739 (1981).
20. E. Hornbogen, K. H. Klein and J. Schmidt, J. Mater. Sci. Lett. 1, 94 (1982).
21. H. Gleiter, in Polycrystals, Proc. 2<sup>nd</sup> Ris. Int. Symp. (edited by N. Hansen et al.), p. 15 (1981).
22. K. Friedrich and E. Hornbogen, J. Mater. Sci. 15, 2175 (1980).
23. R. Seifert and G. Wassermann, Z. Metallk. 22, 381, 854 (1981).
24. Y. Huang, Concrete and Reinforced Concrete, China, No. 5/6 (1982).



# МИКРОСТРУКТУРЫ СПЛАВОВ

Учебное пособие

Перевод с английского А. В. Чувильдеевой

Под редакцией В. Н. Чувильдеева

---

Подписано в печать 03.03.2004. Формат 60×84 1/16.

Отпечатано на ризографе. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 3.2. Тираж 100 экз.

Отпечатано в ООО "Университетская книга"  
603006, Н. Новгород, ул. Ковалихинская, 33