

НОВЫЙ СПЕЦКУРС «ОСНОВЫ ФИЗИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ: ДИФФУЗИИ, ДИСЛОКАЦИИ И МЕХАНИЗМЫ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ» ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ВУЗОВ

Б.Б. Хина

*ГНУ «Физико-технический институт
Национальной академии наук Беларуси», г. Минск, Беларусь*

Рецензент д-р техн. наук, профессор Г.С. Баронин

Ключевые слова и фразы: взаимодействие «диффузия–дефекты»; дислокации; диффузия; механизмы структурообразования; механизмы формирования свойств; физическое материаловедение.

Аннотация: На основе современных научных данных разработан новый спецкурс для магистрантов и аспирантов материаловедческих специальностей. Описаны основы теории дислокаций с точки зрения их влияния на свойства материалов. Рассмотрено взаимодействие диффузионных потоков с дефектами кристаллического строения при низких и высоких температурах. Изложены механизмы формирования структурно-зависимых механических свойств (поведение при деформации, ползучесть, образование микротрещин, разрушение) и другие аспекты, важные для инженеров и исследователей-материаловедов.

Введение

В связи с необходимостью повышения уровня подготовки специалистов в области материаловедения и приведения учебных программ в соответствие с современным уровнем научных знаний в этой бурно развивающейся области, весьма актуальной задачей как высшей школы, так и академической науки является создание новых специализированных учебных курсов для магистрантов и аспирантов материаловедческих специальностей.

В данной работе разработан спецкурс лекций «Основы физического материаловедения: диффузии, дислокации и механизмы структурообразо-

Хина Борис Борисович – доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник, e-mail: khina_brs@mail.ru, ГНУ «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», г. Минск, Беларусь.

вания» для студентов, магистрантов и аспирантов технических вузов. В курсе использована компьютерная техника и средства мультимедиа.

Спецкурс дополняет и углубляет такие курсы, как «Теория термической обработки», «Технология термической и химико-термической обработки металлов», «Металлография» и «Механические свойства», которые обычно входят в программу обучения инженеров-материаловедов. В указанных курсах традиционно используются элементы теории диффузии и дислокаций, однако, лишь фрагментарно и без выявления их связи с механизмами фазо- и структурообразования, протекающими в металлах и сплавах при термической (ТО) и химико-термической обработке (ХТО), а также без учета взаимосвязи между диффузионными процессами и дефектами кристаллического строения (дислокациями, границами зерен). Актуальность такой работы связана также с необходимостью создания новых, ресурсо- и энергосберегающих технологических процессов ТО и ХТО, что требует от инженеров более глубокого понимания механизмов превращений в сталях и сплавах и механизмов формирования свойств.

Интенсивное развитие материаловедения в последние десятилетия привело не только к возникновению новых материалов и методов исследований, к переходу на наноуровень, но и к накоплению новых знаний о механизмах превращений и формирования конечных свойств. Это знания непосредственно используются при синтезе новых материалов. В связи с этим так называемая классическая триада материаловедения «состав + обработка → структура → свойства» в современных условиях должна быть дополнена как механизмами структурообразования при синтезе и обработке материалов, так и механизмами, по которым структура обеспечивает те или иные свойства (рис. 1 – один из вводных слайдов к спецкурсу).

В механизмах фазо- и структурообразования определяющую роль играют диффузионные процессы (существует лишь одно бездиффузионное превращение – мартенситное). Свойства материалов во многом определяются дислокациями, а при повышенных температурах – их взаимодействием с диффузионными потоками (см. рис. 1). Все это мотивирует необходимость создания данного спецкурса.

Особенности и содержание спецкурса

В отличие от одноименных спецкурсов, которые читают на физических факультетах многих университетов, основное внимание уделено не математическим теориям диффузии и дислокаций (как это делают обычно), а механизмам фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах, в которых ведущую роль играет диффузия. Изложены механизмы формирования свойств материалов, связанные с дислокациями, диффузионными процессами и взаимодействием между ними. Такой подход мотивирован следующими соображениями: инженер-материаловед, понимающий сущность и механизмы превращений, сможет сам найти в литературе формулы, необходимые для инженерных оценок или расчетов. Однако, зная только формулы, восстановить по ним физико-химические механизмы процесса невозможно.

В связи с этим основные методы, использованные при подаче материала, формулируются в виде двух тезисов:



Рис. 1. Обоснование необходимости спецкурса

- 1) минимум формул, максимум физико-химических механизмов;
- 2) не только рассказывать, но и показывать.

Для построения и иллюстрирования логических связей и выделения механизмов фазо- и структурообразования использованы средства анимации. Это способствует лучшему пониманию сути рассматриваемых явлений и процессов и более глубокому усвоению студентами материалов спецкурса.

Спецкурс разделен на логические разделы. Использовано большое количество иллюстративных материалов, взятых из современной литературы, в том числе зарубежной: учебников, монографий и научных журналов. Описана роль объемной, зернограничной и поверхностной диффузии в формировании структуры и свойств материалов. Особое внимание уделено взаимодействию диффузионных потоков с точечными дефектами (рис. 2), которое определяет такое практически значимое явление, как высокотемпературная ползучесть и некоторые другие. По каждому механизму структурообразования приведены фотографии получаемых микроструктур.

При изложении основ теории дислокаций акцент сделан не на математические формулировки, а на роль дислокаций в формировании основных механических свойств сплавов – прочности и пластичности. Изложены механизмы твердорастворного, дисперсионного, дисперсного и зернограничного упрочнения сплавов, которые заключаются во взаимодействии дислокаций с легирующими атомами и включениями. Особое внимание уделено механизмам возникновения трещин при низких и умеренных температурах (рис. 3) и пор при высоких температурах (рис. 4), которые

Взаимодействие вакансий с краевыми дислокациями

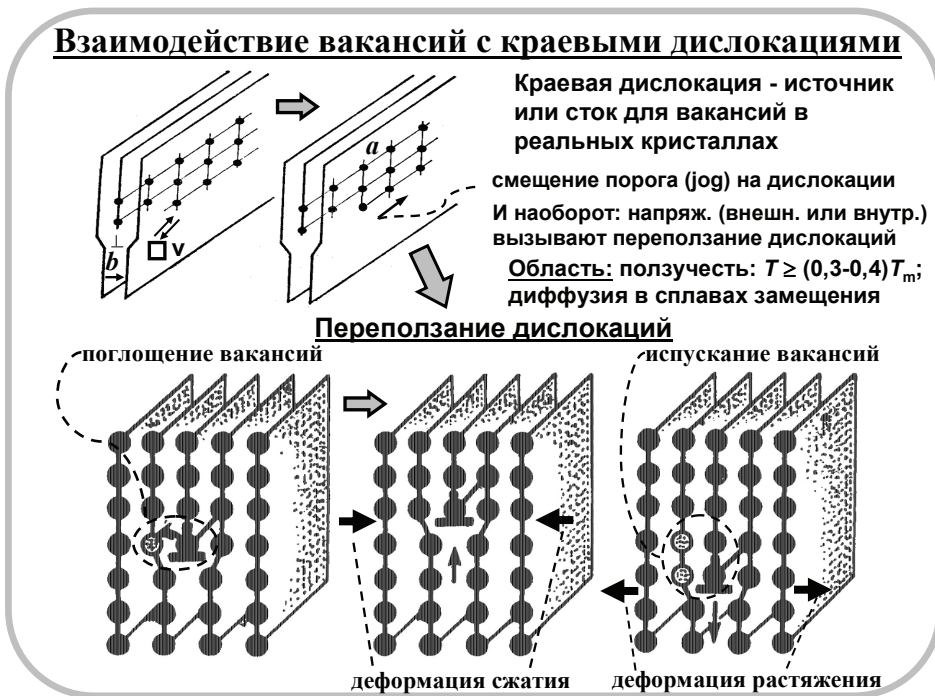


Рис. 2. Механизм диффузионно-контролируемого переползания дислокаций

Механизмы разрушения: микротрещины (низк. T)



Рис. 3. Некоторые механизмы формирования микротрещин

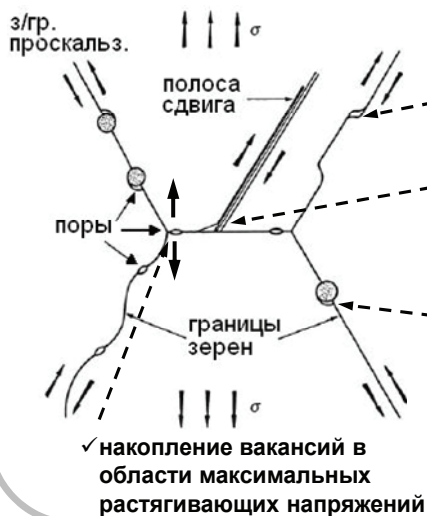
Механизм разрушения при ползучести: поры

➤ III стадия ползучести (tertiary creep):

в ряде случаев разрушение при ползучести в условиях растяжения происходит при весьма малых деформациях: $\varepsilon = 2-5\%$

➤ Причина: образование и **быстрый рост** пор на границах зерен, нормальных к внешнему напряжению

❖ Аналог хрупкого разрушения



➤ Механизмы образования пор (cavitation):

✓ сегрегация примесей на границах зерен - приводит к локальному изменению свойств

✓ механизм Орована - может иметь место при дислокационной ползучести (локально $\sigma \rightarrow \sigma_T$)

✓ образование включений на границах зерен - они препятствуют зернограничному проскальзыванию

➤ Наиболее опасны поры на границах зерен, нормальных к внешнему напряжению

Рис. 4. Механизм формирования и роста пор при ползучести

ответственны за разрушение материалов и изделий при их эксплуатации. Также подробно описаны механизмы разрушения и приведены фотографии изломов для каждого механизма.

Поскольку во многих практически важных процессах в различных областях параметров (напряжение, температура) работают разные механизмы, связанные с диффузией и поведением дислокаций, возникает вопрос о взаимосвязи этих механизмов и областях их реализации. В связи с этим в спецкурс включены карты механизмов деформации в поликристаллических материалах – так называемые диаграммы Виртман–Эшби (рис. 5).

При изложении такой темы как многокомпонентная диффузия в твердых растворах, которая имеет место при ХТО, контакте различных сплавов и в сварных соединениях, акцент сделан не на хорошо разработанный математический аппарат теории диффузии, базирующийся на линейной неравновесной термодинамике (как обычно делают в курсах, читаемых на физических факультетах многих университетов), а на иллюстративный материал – в частности, на классические эксперименты Даркена (рис. 6).

При рассмотрении механизмов диффузионно-контролируемых фазовых превращений в данном спецкурсе, наряду с перлитным и аустенитным превращениями, изложен отсутствующий во многих классических учебниках механизм прерывистого распада пересыщенного твердого раствора, когда лимитирующей стадией является не объемная, а зернограничная диффузия по мигрирующим границам (рис. 7). Этот механизм имеет место, в частности, в безникелевых нержавеющей сталях, легированных азотом.

Карты механизмов деформации в поликристаллах

➤ **Общая диаграмма:**

определяет области реализации различных механизмов деформации в координатах "гомологическая температура T/T_m " - "нормализованное напряжение σ/G " (deformation mechanism maps) - диаграммы Виртман-Эшби [Julia Weertman and Michael Ashby]

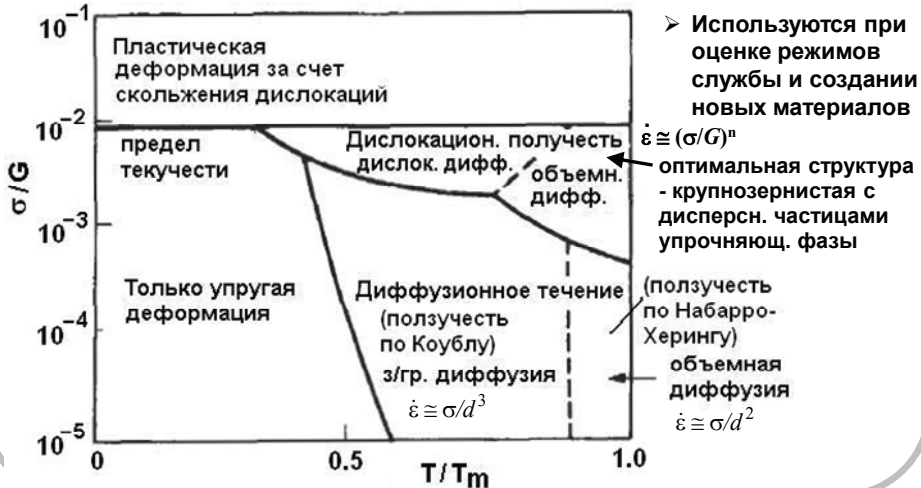
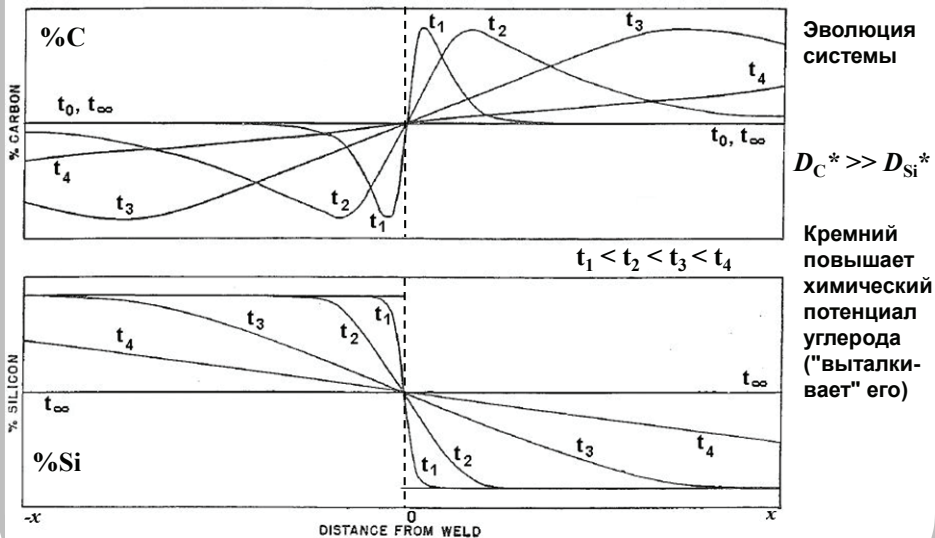


Рис. 5. Общий вид диаграммы механизмов деформации в поликристаллических материалах (диаграмма Виртман-Эшби)

Диффузия в многокомпонентных системах

Опыт Даркена [L.S.Darken, 1949]: $\gamma\text{-Fe} + \text{C} + \text{Si}$, отжиг при $T=1100\text{ }^\circ\text{C}$, 13 дней



Область реализации: сварные соединения, биметаллы, ТО, ХТО, спекание в многокомпонентных системах

Рис. 6. Диффузия в многокомпонентном твердом растворе

**Прерывистый распад пересыщенного твердого раствора (discontinuous precipitation)
(вид диффузионного превращения *при старении*)**



Рис. 7. Механизм прерывистого распада твердого раствора

Заключение

В спецкурсе также уделено внимание таким процессам и механизмам, которые недостаточно описаны в русскоязычной учебной литературе, но детально изложены в иностранной – например, формирование в сплавах зон, свободных от выделений упрочняющей фазы (precipitate-denuded zones), что послужило причиной ряда аварий в гражданской авиации. В заключительной части показаны особенности диффузии в новых материалах, в том числе наноструктурных, и в новых методах их синтеза, таких как самораспространяющийся высокотемпературный синтез, механическое легирование и некоторых других. В конце курса приведен список рекомендуемой литературы для самостоятельного чтения [1–14]. В настоящее время курс рассчитан на 20 лекций и содержит более 400 анимированных слайдов Power Point.

Таким образом, разработан новый спецкурс лекций «Основы теории диффузии и теории дислокаций» для студентов-металловедов, магистрантов и аспирантов технических вузов. Курс основан на современных представлениях о механизмах фазо- и структурообразования в металлических материалах и формированиях их свойств при ТО, ХТО и последующей эксплуатации.

Список литературы

1. Бельченко, Г.И. Основы металлографии и пластической деформации стали / Г.И. Бельченко, С.И. Губенко. – Киев ; Донецк : Выща шк., 1987. – 240 с.
2. Бокштейн, Б.С. Диффузия в металлах / Б.С. Бокштейн. – М. : Металлургия, 1978. – 248 с.

3. Гегузин, Я.Е. Диффузионная зона / Я.Е. Гегузин. – М. : Наука, 1979. – 344 с.
 4. Новиков, И.И. Кристаллография и дефекты кристаллической решетки / И.И. Новиков, К.М. Розин. – М. : Metallurgy, 1990. – 336 с.
 5. Трушин, Ю.В. Физическое материаловедение : учеб. для вузов / Ю.В. Трушин. – СПб. : Наука, 2000. – 286 с.
 6. Физическое металловедение : в 3-х т. / под ред. Р.У. Кана, П.Т. Хаазена ; пер. с англ. под ред. О.В. Абрамова [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Metallurgy, 1987. – 3 т.
 7. Ashby, M.F. Engineering Materials / M.F. Ashby, D.R.H. Jones. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 1996. – 322 p.
 8. Bhadeshia, H.K.D.H. Steels: Microstructure and Properties / H.K.D.H. Bhadeshia, R. Honeycombe. – Oxford : Elsevier, 2006. – 344 p.
 9. Cahn, R.W. The Coming of Materials Science / R.W. Cahn. – Oxford : Elsevier, 2001. – 598 p.
 10. Heitjans, P. Diffusion in Condensed Matter: Methods, Materials, Models / P. Heitjans, J. Karger. – Berlin : Springer, 2005. – 965 p.
 11. Kaur, I. Fundamentals of Grain and Interphase Boundary Diffusion / I. Kaur, Yu. Mishin, W. Gust. – N. Y. : J. Wiley and sons, 1995. – 590 p.
 12. Mehrer, H. Diffusion in Solids / H. Mehrer. – Berlin : Springer, 2007. – 651 p.
 13. Meyers, M.A. Mechanical Behavior of Materials / M.A. Meyers, K.K. Chawla. – Cambridge : Cambridge University Press, 2009. – 856 p.
 14. Smallman, R.E. Physical Metallurgy and Advanced Materials / R.E. Smallman, A.H.W. Ngan. – Oxford : Elsevier, 2007. – 672 p.
-

**The New Course
“Basics of Physical Material Science: Diffusion, Dislocations
and Structuring Mechanisms”
for Technical Universities**

B.B. Khina

*Physical Technical Institute
National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

Key words and phrases: diffusion; diffusion-defects interaction; dislocations; physical metallurgy; property-forming mechanisms; structure formation mechanisms.

Abstract: Basics of the dislocation theory are presented from the standpoint of their effect on the material properties. Special attention is given to the interaction of diffusion fluxes with crystal defects, which takes place at both high and low temperatures, as well as to the mechanisms of formation of structure-dependent mechanical properties (such as deformation behavior, creep, microcracking, fracture of materials) and some other aspects important for Materials Scientists and Engineers.

© Б.Б. Хина, 2012