

конкурирующего рынка / А.Н. Бобок // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2005. – № 3. – С. 20–26.

**5. Файншмидт, Е.М.** Теория и практика термической обработки в кипящем слое изделий из металлов и сплавов / Е.М. Файншмидт // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2005. – № 3. – С. 4–19.

**6. Ворошнин, Л.Г.** Теория и технология химико-термической обработки: учеб. пособие / Л.Г. Ворошнин, О.Л. Менделеева, В.А. Сметкин. – Минск: Новое знание, 2010. – 304 с.

**7. Константинов, В.М.** Ускоренная диффузия легирующих элементов в железе при химико-термической обработке порошков во вращающемся контейнере / В.М. Константинов // *Доклады НАН Беларуси.* – 2007. – Т. 51, № 2. – С. 103–107.

*УДК 539.2+539.3*

**Б.Б. ХИНА, д-р физ.-мат. наук,  
В.М. КОНСТАНТИНОВ, д-р техн. наук (БНТУ)**

## **ОПЫТ ПОВЫШЕНИЯ НАУЧНОЙ КВАЛИФИКАЦИИ МАГИСТРАНТОВ И АСПИРАНТОВ-МАТЕРИАЛОВЕДОВ В ВОПРОСАХ ДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ И ДИСЛОКАЦИОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ\***

**Введение.** Современный уровень развития материаловедения, бурное развитие нанотехнологий и материалов настоятельно требует расширения глубины понимания магистрантами и аспирантами физической и химической сути процессов, имеющих место при получении, обработке и использовании новых материалов. Актуальность связана также и с необходимостью создания новых ресурсо- и энергосберегающих технологических процессов термической (ТО) и химико-термической обработки (ХТО), что требует от материаловедов более глубокого понимания как механизмов превращений в сталях и сплавах, так и связей между получаемой структурой и конечными свойствами.

С целью достижения поставленной цели нами разработан новый интерактивный спецкурс «Диффузионные процессы, дислокационные взаимодействия и механизмы формирования структуры и свойств в металлах и сплавах» для студентов, магистрантов и аспирантов материаловедческих специальностей БНТУ. В курсе использована компьютерная техника и средства мультимедиа – в частности, анимированные слайды MS Power Point. Курс обладает определенной степенью универсальности и широты, что позволяет использовать его отдельные части для чтения ряда спецпредметов.

**Основная идея спецкурса.** Отметим, что в таких курсах как «Теория термической обработки», «Теория и технология химико-термической обработки металлов», «Металлография», «Механические свойства», которые обычно входят в программу обучения инженеров-материаловедов, 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 ТО и ХТО, а также без учета взаимосвязи между диффузионными процессами и дефектами кристаллического строения (дислокациями, границами зерен).

Основная идея разработанного нами спецкурса заключается не в дополнении и углублении вышеуказанных классических курсов на современном уровне, а в следующем. Базовой концепцией материаловедения является так называемая классическая триада «состав + обработка → структура → свойства». Но известно, что одну и ту же структуру можно получить разными методами обработки: например, зернистый перлит – путем улучшения (закалка и высокий отпуск) либо при длительном сфероидизирующем отжиге. Кроме того, одно и то же свойство (например, твердость) можно получить на материалах с различной структурой. Таким образом, в указанной классической концепции отсутствует важное понятие о том, каким образом конкретные состав и обработка приводят к формированию определенной структуры, а также раздел о том, почему конкретная структура обладает теми или иными свойствами. В последние десятилетия интенсивное развитие материаловедения привело не только к возникновению новых материалов и методов исследований, к переходу на наноуровень, но и к накоплению новых знаний как о механизмах превращений, так и о том, каким образом та или иная структура обеспечивает формирование конечных свойств. Эти зна-

ния могут быть непосредственно использованы при синтезе новых материалов с требуемыми свойствами. Поэтому, по мнению авторов, базовая концепция современного материаловедения должна выглядеть так (рисунок 1): «состав + обработка → механизмы структурообразования → структура → механизмы формирования свойств → структура → свойства».



Рисунок 1 – Основная идея спецкурса (авторская концепция)

Определяющую роль в механизмах фазо- и структурообразования играют диффузионные процессы (существует лишь одно бездиффузионное превращение – мартенситное). Свойства материалов во многом определяются дислокациями, их взаимодействием друг с другом, с включениями и границами зерен. При повышенных температурах, наряду с дислокационной подсистемой, важную роль в формировании свойств материалов играет диффузия и взаимодействие диффузионных потоков с дислокациями и другими дефектами.

В связи с вышеизложенным, основная идея разработанного курса состоит в последовательном и систематическом изложении как ме-

ханизмов превращений, которые связаны с диффузионными процессами и обеспечивают фазо- и структурообразование при получении и обработке материалов, так и механизмов формирования свойств, основанных на сложных дислокационных взаимодействиях.

В результате усвоения курса магистранты и аспиранты приобретают базовые знания о механизмах структурообразования материалов и покрытий при их получении и обработке (например, ТО, ХТО, самораспространяющийся высокотемпературный синтез – СВС, механическое легирование – МЛ и др.) и о механизмах формирования свойств материалов (упрочнение, разупрочнение, разрушение). Кроме того, на семинарах, которые являются неотъемлемыми компонентами учебного процесса по данному курсу (см. ниже), они получают примеры и приобретут навыки использования новых знаний для анализа механизмов фазо- и структурообразования применительно к проблемам, возникающим при работе над магистерской или кандидатской диссертацией, и научатся определять пути их решения для достижения конечной цели – созданию новых материалов/покрытий с улучшенными функциональными свойствами.

**Методология и особенности спецкурса.** В отличие от спецкурсов с похожими названиями («Теория диффузии», «Теория дислокаций», «Теория дефектов в материалах» и т.п.), которые читают на физических факультетах многих университетов, основное внимание в данном курсе 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: 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-химический механизм, обеспечивающий получение той или иной структуры материала, невозможно. Например, процессы диффузии и теплопроводности описываются одними и теми же уравнениями (законы Фика для диффузии являются аналогами закона Фурье для кондуктивного теплопереноса) и их аналитические решения для

типичных случаев одинаковы, однако лежащая в основе физика и конечное применение решений – совершенно различны.

Отметим также, что в последние годы математическая подготовка студентов, выбирающих для себя материаловедческие специальности, существенно ухудшилась. Это связано как со снижением уровня школьной подготовки, так и «утечкой мозгов» – абитуриенты, которые лучше знают математику, выбирают для себя специальности, связанные с информационными технологиями и программированием. Кроме того, случаи, когда инженеры или исследователи-материаловеды в своей практической работе по созданию новых материалов используют сложные методы математического моделирования, даже в XXI веке имеют место не так уж часто. Основными инструментами материаловеда являются микроструктурный и фазовый анализ, исследование механических свойств (твердость, микротвердость, предел прочности и др.). Поэтому для материаловеда весьма важно обладать знаниями о том, как сформировалась именно та микроструктура, которую он наблюдает, почему она обладает именно этими свойствами, и как можно воздействовать на процессы ее получения/обработки, чтобы добиться нужных свойств. В такой профессиональной ситуации математические формулировки гораздо менее важны, чем знания о механизмах структурообразования и формирования свойств.

В связи с этим методология спецкурса формулируются в виде следующих тезисов:

- 1) минимум формул, максимум физико-химических механизмов;
- 2) не только рассказывать, но и показывать (схемы, рисунки, фотографии микроструктур);
- 3) от простого к сложному. Например, от основ диффузии, дислокаций и др. дефектов → к физическим явлениям, в которых задействованы диффузия и дислокации → к механизмам превращений и структурообразования → к формированию свойств → к комплексным механизмам формирования фазового состава и структуры при синтезе новых материалов и покрытий;
- 4) взаимосвязь явлений. Например, роль диффузии не только в фазовых превращениях при ТО и ХТО, но и в поведении материалов под нагрузкой при повышенных температурах (ползучесть и механизмы разрушения на третьей стадии ползучести);

5) примеры практической реализации описываемых явлений и физико-химических механизмов.

В данном спецкурсе большое внимание уделено иллюстративному материалу: по каждому описываемому явлению и механизму приводятся схемы, рисунки, фотографии микроструктур, полученные оптическим и электронно-микроскопическим анализом, в некоторых случаях – результаты моделирования, а при изложении механизмов разрушения материалов – фрактограммы.

Вышеизложенная методология и логические связи, положенные в основу спецкурса, схематично изображены на рисунке 2 наряду с основными рассматриваемыми темами.

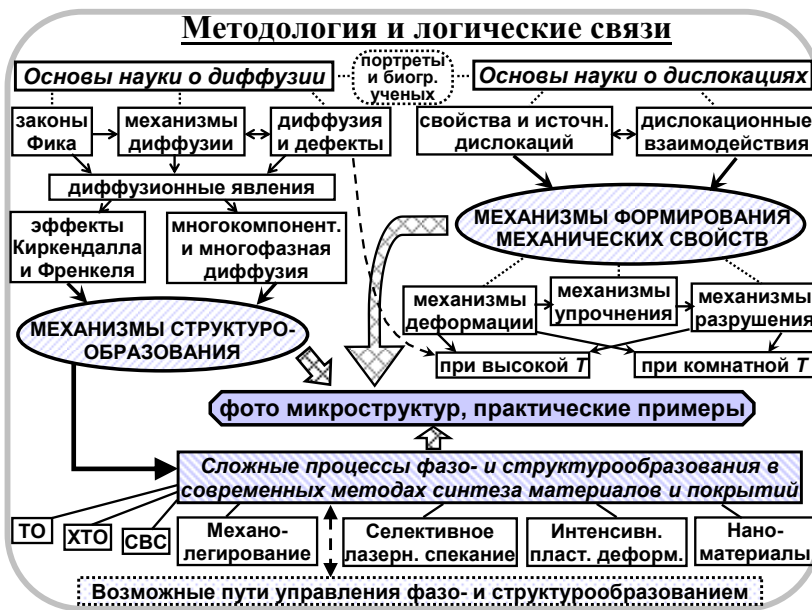


Рисунок 2 – Методология, структура и логические связи спецкурса (авторская концепция)

Для построения и иллюстрирования логических связей и выделения механизмов фазо- и структурообразования использованы средства анимации, имеющиеся в MS Power Point. Это способствует

лучшему пониманию сути рассматриваемых явлений и процессов и более глубокому усвоению студентами материалов спецкурса.

При изложении курса уделено внимание историческому аспекту, приведены портреты и краткие биографические сведения об ученых, внесших существенный вклад в науку о диффузии и дислокациях (А. Фик, М. Смолуховский, А. Эйнштейн, В. Нернст, Я.И. Френкель, Э. Киркендалл, Л. Даркен, В. Вольтерра, Я. Бюргерс, Ф. Франк, Э. Орован, Ф. Набарро, Р. Кан и др.) и о первооткрывателях новых методов синтеза и обработки материалов (А.Г. Мержанов, Дж. Бенджамин, В.М. Сегал). Это реализует педагогический принцип «развлекая – обучать»: обеспечивает переключение внимания студентов во время лекций, снижает утомляемость и тем самым способствует улучшению усвоения основного материала.

**Структура и содержание спецкурса.** Спецкурс разделен на логически взаимосвязанные разделы «Основы диффузионных процессов», «Механизмы диффузионного структурообразования», «Основы теории дислокаций», «Механизмы формирования свойств», «Фазо- и структурообразование в современных методах синтеза материалов и покрытий» и др. (рисунок 2). При чтении лекций, наряду с информацией из классической учебной литературы [1–6], использованы закономерности и механизмы, описанные в современных монографиях (преимущественно англоязычных) [7–13] и статьях в рецензируемых научных журналах, а при изложении механизмов структурообразования при синтезе новых материалов – результаты собственных исследований авторов [14]. В настоящее время спецкурс рассчитан на 24 занятия (лекции и два семинара) и содержит более 400 анимированных слайдов MS Power Point.

Последовательность занятий по курсу схематично показана на рисунке 3.

При описании основ диффузионных процессов, после понятия о диффузии и законов Фика излагаются механизмы диффузии и взаимодействия диффузионных потоков с различными дефектами структуры. Далее преподаватель переходит к «элементарным» явлениям, связанным с диффузией: эффект Киркендалла и Френкеля, диффузия в однофазном многокомпонентном твердом растворе, понятие диффузионного пути на диаграмме состояния, а затем – к диффузии в многофазной системе. При этом приводится большое количество рисунков и схем. Далее излагаются основные механиз-

мы фазо- и структурообразования, связанные с диффузией, которые основаны на упомянутых «элементарных» явлениях. По каждому механизму приводятся фотографии микроструктур и примеры практической реализации (рисунки 2 и 3).



Рисунок 3 – Последовательность и структура занятий по курсу

Затем излагаются основы теории дислокаций. Вначале описаны виды и основные свойства дислокаций, их размножение (формирование и работа источника Франка-Рида) и взаимодействия между ними, что обеспечивает пластическую деформацию материалов с кристаллической структурой. Далее рассмотрено взаимодействие дислокаций с включениями и границами зерен при деформации. Акцент сделан не на математические формулировки (как это делают обычно), а на роль дислокаций в формировании основных механических свойств сплавов. При этом рассматриваются механизмы упрочнения: дислокационное, твердорастворное, дисперсионное, дисперсное и зернограничное. Для последнего случая изложены физические механизмы, стоящие за формулой Холла–Петча и воз-



возможные причины отклонения от нее в наноструктурных материалах. По каждому механизму приведены рисунки и фотографии микроструктур. Далее рассматриваются механизмы разрушения, включающие формирование зародышей трещин и их распространение в хрупких и вязких материалах при различных температурах. Показана роль диффузии при высокотемпературном разрушении (третья стадия ползучести). Приведены фотографии изломов (фрактограммы) для каждого механизма и наглядно продемонстрировано различие между ними. Для иллюстрации взаимосвязи механизмов разрушения и их реализации в разных областях параметров (напряжение и температура) использованы карты механизмов деформации в поликристаллических материалах (диаграммы Виртман–Эшби).

### **Пример влияния механизма структурообразования на служебные свойства материала**

**Современный пассажирский самолет Boeing-767**

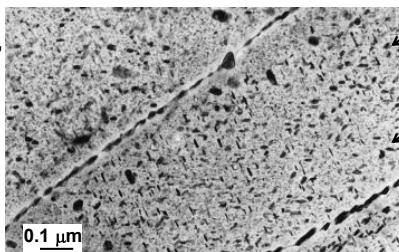


Стареющий сплав 7150-T651 ( $\text{Al}$  - 6.2% Zn - 2.3% Cu - 2.3% Mg - 0.12% Zr)

➤ Применение в самолете Boeing-767: верхняя обшивка крыла, детали внутренней структуры крыла, элементы фюзеляжа

**Микроструктура сплава после правильного режима старения,  $\times 80475$ :**

- ✓ дисперсно-упрочненная матрица (твердый раствор)
- ✓ малая толщина ОВЗ вдоль границы
- ✓ высокие механические свойства при знакопеременных нагрузках



включ.  $\eta$ -фазы ( $\text{MgZn}_2$ )

твердый раствор на осн.  $\text{Al}$

Рисунок 4 – Один из практических примеров к спецкурсу

В данном спецкурсе уделено внимание таким процессам и механизмам, которые недостаточно описаны в русскоязычной учебной литературе, но детально изложены в иностранной. В качестве примера (рисунок 4) приведено формирование областей вдоль границ

зерен, где почти отсутствуют выделения упрочняющей фазы (ОВЗ – обедненные включениями зоны) и показаны пути минимизации этого вредного явления, которое послужило причиной ряда аварий в гражданской авиации.

Важное значение придается самостоятельной работе студентов, магистрантов и аспирантов. После цикла лекций по механизмам формирования свойств проводится промежуточный семинар в форме научной дискуссии (рисунок 3). Каждый магистрант/аспирант делает краткий доклад по проблемам, с которыми он сталкивается в процессе исследований. Далее проходит общая дискуссия, и совместно с преподавателем (разработчиком данного курса) присутствующие пытаются определить, какие именно механизмы могут работать в данном процессе. Итоги семинара дают молодому исследователю-материаловеду новые идеи для дальнейшей работы над магистерской или кандидатской диссертацией.

После этого на лекционных занятиях излагаются особенности диффузионных процессов и сложные механизмы структурообразования в современных процессах синтеза новых материалов. К таким процессам относятся СВС, МЛ, селективное лазерное спекание, некоторые методы получения наноматериалов, интенсивная пластическая деформация (например, равноканально-угловое (РКУ) прессование) и др. Эти механизмы основаны на ранее изложенных «простых» механизмах, но во многих случаях из-за сложности и многофакторности процессов они реализуются в необычной форме (с точки зрения традиционного материаловедения) и приводят к получению новых свойств. Поэтому знания о подобных комплексных механизмах могут быть использованы слушателями спецкурса в собственных исследованиях.

В заключительных лекциях излагаются основные известные на сегодняшний день пути воздействия на диффузионные процессы фазо- и структурообразования (рисунки 2, 3) с позиции классификации этих путей, которая предложена авторами спецкурса. Во время лекционных занятий преподаватель (один из разработчиков данного спецкурса) проводит дискуссию с участием присутствующих.

В конце обучения проводится заключительный семинар в форме научной дискуссии. Магистранты/аспиранты делают краткие доклады о своих исследованиях и возникших проблемах. Затем происходит общая дискуссия, и с помощью преподавателей (разработчи-

ков данного курса) молодой исследователь, на основе приобретенных знаний о механизмах структурообразования, пытается выработать пути их преодоления и возможные способы достижения конечного результата (создание нового материала/покрытия и разработка метода его получения).

В конечном итоге, магистранты и аспиранты получают новые систематизированные знания как о механизмах структурообразования в современных материалах при их синтезе и обработке, так и о механизмах формирования свойств. Весьма важно, что они получают навыки применения полученных знаний к решению конкретных исследовательских задач, а также приобретают опыт выступления с научными докладами и участия в дискуссиях.

### **Заключение**

Разработан новый модульный спецкурс лекций «Диффузионные процессы, дислокационные взаимодействия и механизмы формирования структуры и свойств в металлах и сплавах» для магистрантов и аспирантов технических ВУЗов, обучающихся по специальностям, материаловедческого профиля.

Назначение курса заключается в изложении на современном научном уровне механизмов фазо- и структурообразования при получении материалов и механизмов формирования их свойств при ТО, ХТО и последующей эксплуатации при различных температурах. Использование спецкурса в учебном процессе дает студентам, магистрантам и аспирантам новые глубокие знания о том, как формируется та или иная структура и почему она обладает данными механическими свойствами. Также они получают важные навыки использования этих знаний в своих исследованиях по магистерской или кандидатской диссертации.

В настоящее время указанный курс успешно используется в магистерской подготовке по специальностям 1-42 80 01 «Металлургия» («Диффузионные процессы и дислокационные взаимодействия в металлах и сплавах»), 1-42 81 01 «Металлургические технологии повышения конкурентоспособности продукции» («Диффузионные процессы в сплавах при термической обработке»), а также «ХТО сталей»), 1-36 80 04 «Обработка конструкционных материалов в машиностроении» («Теория и технология ТМО»).

## Литература

1. **Физическое металловедение** (в 3-х томах) / Под ред. Р.У. Кана, П. Хаазена. – М.: Металлургия, 1987. – Т. 1. – 640 с. – Т. 2. – 623 с. – Т. 3. – 663 с.
2. **Трушин, Ю.В.** Физическое материаловедение / Ю.В. Трушин. – СПб.: Наука, 2000. – 286 с.
3. **Новиков, И.И.** Кристаллография и дефекты кристаллической решетки / И.И. Новиков, К.М. Розин. – М.: Металлургия, 1990. – 336 с.
4. **Хоникомб, Р.** Пластическая деформация металлов / Р. Хоникомб. – М.: Мир, 1972. – 408 с.
5. **Ashby, M.F.** Engineering Materials / M.F. Ashby, D.R.H. Jones. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 1996. – V. 1. – 322 pp.
6. **Бокштейн, Б.С.** Диффузия в металлах / Б.С. Бокштейн. – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
7. **Гегузин, Я.Е.** Диффузионная зона / Я.Е. Гегузин. – М.: Наука, 1979. – 344 с.
8. **Smallman, R.E.** Physical Metallurgy and Advanced Materials / R.E. Smallman, A.H.W. Ngan. – Oxford: Elsevier, 2007. – 672 pp.
9. **Kaur, I.** Fundamentals of Grain and Interphase Boundary Diffusion / I. Kaur, Yu. Mishin, W. Gust. – New York: J.Wiley and sons, 1995. – 590 pp.
10. **Heitjans, P.** Diffusion in Condensed Matter: Methods, Materials, Models / P. Heitjans, J. Karger. – Berlin: Springer, 2005. – 965 pp.
11. **Mehrer, H.** Diffusion in Solids / H. Mehrer. – Berlin: Springer, 2007. – 651 pp.
12. **Meyers, M.A.** Mechanical Behavior of Materials / M.A. Meyers, K.K. Chawla. – Cambridge: Cambridge University Press, 2009. – 856 pp.
13. **ASM Handbook: Fractography.** – ASM International, USA, 1987. – V. 12. – 857 pp.
14. **Khina, B.B.** Combustion Synthesis of Advanced Materials / B.B. Khina. – New York, Nova Science, 2011. – 110 pp.