

ликман. - Москва: АСТ, 2009. - 701 с.

2. Махмутов, М.И. Методы проблемно-развивающего обучения в средних профтехучилищах: метод. рекомендации / М.И. Махмутов. - М.: АПН СССР, 1983. - 63 с.

УДК 539.2+539.3

**НОВЫЙ МУЛЬТИМЕДИЙНЫЙ СПЕЦКУРС  
«ДИФФУЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИСЛОКАЦИОННЫЕ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ»  
ДЛЯ МАГИСТРАНТОВ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ**

**NEW LECTURE COURSE WITH MULTIMEDIA ELEMENTS  
«DIFFUSION PROCESSES AND DISLOCATION INTERACTIONS  
IN METALS AND ALLOYS» FOR MS STUDENTS IN MATERIALS SCIENCE**

**Константинов В.М.**

**Konstantinov V.**

Белорусский национальный технический университет

**Хина Б.Б.**

**Khina B.**

Физико-технический институт НАН Беларуси

Минск, Беларусь

*A new specialized lecture course for MS students of technical universities, which are majoring in Materials Science, is developed using up-to-date multimedia means. The subject matter of this course includes the mechanisms of phase and structure formation during synthesis and processing of modern materials and the mechanisms through which the material structure determines its mechanical properties, e.g., deformation, strengthening and fracture. This course includes both lectures and seminars. The latter are held in the form of scientific discussion, where the students acquire the skills of applying the knowledge on the structure formation mechanisms to solving the problems that arise during their research for the fulfillment of MS dissertation.*

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 высшей школы и академической науки является создание новых специализированных учебных курсов для магистрантов материаловедческих специальностей с использованием современных мультимедийных средств.

В данной работе освещен опыт создания и преподавания спецкурса лекций «Диффузионные процессы и дислокационные взаимодействия в металлах и сплавах» для магистрантов специальностей 1-42 80 01 «Металлургия» и 1-36 80 05 «Обработка конструкционных материалов» кафедры «Материаловедение в машиностроении» БНТУ.

Отметим, что в таких курсах как «Теория термической обработки», «Теория и технология химико-термической обработки металлов», «Металлография» и «Механические свойства», которые обычно входят в программу обучения инженеров-

материаловедов, 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). Основная идея разработанного спецкурса заключается не в дополнении и углублении вышеуказанных классических курсов на современном уровне. Она состоит 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. 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 данные 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 знания могут быть непосредственно использованы при синтезе новых материалов с требуемыми свойствами. Поэтому, по мнению авторов, базовая концепция современного материаловедения должна выглядеть так (рис. 1): «состав + обработка → механизмы структурообразования → структура → механизмы формирования свойств → свойства». Актуальность такой работы связана также с необходимостью создания новых, ресурсо- и энергосберегающих технологических процессов ТО и ХТО, что требует от научно-технических и инженерных кадров более глубокого понимания механизмов превращений в сталях и сплавах.



Рис. 1. Основная идея спецкурса (авторская концепция)

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 его 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.

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, которое определяет такое практически значимое явление как высокотемпературная ползучесть и некоторые другие.

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 и пор при высоких температурах, которые ответственны за разрушение материалов и изделий при их эксплуатации.

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.

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 сделано в курсах, читаемых на физических факультетах многих университетов), а на иллюстративный материал – в частности, на классические эксперименты Даркена.

При рассмотрении механизмов диффузионных-контролируемых фазовых превращений в данном спецкурсе, наряду с перлитным и аустенитным превращениями, изложен отсутствующий в классических учебниках механизм прерывистого распада пересыщенного твердого раствора, когда лимитирующей стадией является не объемная, а зернограничная диффузия. Этот механизм имеет место, в частности, в безникелевых нержавеющей сталях аустенитного класса, легированных азотом.

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-free 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 приведен список рекомендуемой литературы для самостоятельного чтения.

Таким образом, разработан новый спецкурс лекций «Основы теории диффузии и теории дислокаций в металлах и сплавах», основанный на современных представлениях о механизмах фазо- и структурообразования в металлических материалах и формирования их свойств при ТО, ХТО и последующей обработке и эксплуатации изделий из металлов и сплавов. Он дает магистрантам более глубокое понимание процессов структурообразования в процессах термической обработки металлов и сплавов. Наличие подобного «инструмента» в арсенале исследователя и разработчика позволяет более эффективно синтезировать новые материалы и упрочняющие технологии.