

менты, не входящие в состав выделения. Инфильтрация этих элементов в выделение может приводить к фазовому переходу с изменениями стехиометрии и типа решетки. По-видимому, именно по такому механизму из фосфидов и крупных карбонитридов образуются выделения G-фазы.

G-фаза имеет решетку изоморфную матричной, но межфазная граница не является полностью когерентной. Благодаря сегрегации компонентов стали к частично некогерентной границе в окрестности выделения поддерживается такой локальный состав матрицы, при котором G-фаза устойчива.

Описанные выше механизмы эволюции фазового состава действуют в интервале температур, где облучение вызывает сегрегационные процессы. С ростом скорости создания смещений высокотемпературная граница этого интервала сдвигается в область более высоких температур. Соответственно расширяется область устойчивости некогерентных фаз [3]

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зеленский В.Ф., Неклюдов И.М. ВАНТ. сер. ФРПиРМ, 1984. Вып. 1-2 (29-30). - С. 6-76.
2. Бакай А.С., Туркин А.А, Туркин Ю.А. ФММ, 1990. - С.67.
3. Marwick A.D. J. Phys. F: Metal. Phys. 8 (1978), 1849.
4. Wiedersich H., Okamoto P.R. and Lam N.Q.J. Nucl. Mater. 8 (1979) 98.
5. Bakai A.S. and Turkin A.A. J. Nucl. Mater. 152 (1988) 331.

#### МАТЕРИАЛЫ С ЗАДАННОЙ РЕАКЦИЕЙ НА ВНЕШНЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ (“МЫСЛЯЩИЕ МАТЕРИАЛЫ”)

В.Ф.Зеленский, И.М.Неклюдов,  
Т.П.Черняева (ННЦ ХФТИ),  
Н.В.Камышанченко (БГПУ),  
А.М.Паршин (СПбГТУ)

Выбор конструкционных материалов осуществляется, в основном, по исходным данным их сопротивления внешним механическим, тепловым, радиационным, электромагнитным воздействиям. Время и условия эксплуатации конструкционных материалов, как правило, приводят к деградации их исходных свойств, к потере ресурса работоспособности изделий и конструкций из них.

Анализ большого объема данных по различным способам повышения устойчивости конструкционных материалов к внешним воздействиям эволюции, структурно-фазового состояния и физико-механических свойств их позволяет выделить особый класс имеющихся и определить возможности создания новых сталей, сплавов, соединений, которые бы в условиях эксплуатации совершенствовались или изменялись в необходимом

направлении свою структуру, геометрию и свойства. Такие материалы с благоприятной (положительной) реакцией на внешние воздействия, способные длительно поддерживать или даже повышать свою работоспособность при эксплуатации, выполнять заранее заданные функции и формоизменения, могут быть отнесены к самоорганизующимся системам, или "мыслящим" материалам [1].

Одним из примеров реализации положительной реакции структурного состояния и свойств металлов и сплавов на внешние воздействия является их поведение в условиях программного упрочнения [2,3]. Оно заключается в отжиге, отпуске, старении материалов или изделий из них в эксплуатационных условиях роста внешних нагрузок в макроупругой области деформаций со скоростью, соответствующей скорости диффузионных и микросдвиговых процессов релаксации локальных перенапряжений и упрочнения слабых мест в реальных кристаллических материалах. Интенсивность внешних воздействий - теплового, механического, радиационного, электромагнитного - при этом должна соответствовать скорости повышения внутреннего сопротивления структуры без разрушения межатомных связей. То есть этот процесс должен быть саморегулирующимся, с обратной связью. При таких условиях внешнего воздействия материалы и изделия при эксплуатации становятся механически более однородными и термодинамически равновесными.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований закономерностей изменения структуры и свойств металлов и сплавов с неравновесной концентрацией точечных дефектов, создаваемой закалкой, термоциклированием, облучением, озвучиванием, позволили установить новые эффективные способы направленного формирования структуры и свойств кристаллических тел, расширить возможности программного упрочнения материалов [4,5].

Типичным примером "мыслящих" материалов являются сплавы, обладающие высокой склонностью к обратимости пластической деформации, а следовательно, к восстановлению формы. Деформированные до степеней, значительно превышающих величину упругой деформации, образцы из таких материалов восстанавливают свои размеры и форму либо при снятии нагрузки (явление сверхупругости), либо при нагреве в свободном состоянии до определенных температур (эффект памяти формы) [6]. Особенно ярко эти явления наблюдаются в материалах с термоупругими мартенситными превращениями в температурной области одновременного существования мартенситной и аустенитной фаз (Ni-Ti, Cu-Zn, Cu-Al-Ni, Au-Cd, Ag-Zn, Fe-Ni, Fe-Be, Cu-Ni-Ti). Материалы с эффектом памяти формы находят все более широкое использование в самых различных областях науки и техники.

К материалам, способным выполнять необходимые функции, поддерживать или совершенствовать свою работоспособность, можно отнести би- и многослойные композиционные материалы. Наиболее прочные, вакуумплотные соединения таких разнородных слоистых материалов до-

стигаются с помощью горячей прокатки в вакууме [7].

В отличие от однородных гомогенных металлов, сталей, сплавов и соединений, они состоят из двух и большего количества слоев разных металлов или сплавов с отличающимися физико-механическими свойствами.

Благодаря своеобразной "внутренней архитектуре" такие композиты могут обладать уникальным сочетанием свойств, проявляющихся только в определенных условиях эксплуатации. Так, например, композит, состоящий из тонкого слоя (~ 50 мкм) высокопрочной износостойкой стали или сплава и двух внешних слоев мягкой стали, может обеспечить реализацию эффекта самозаточки режущего инструмента за счет преимущественного износа внешних слоев стали. Другим примером программно изменяющего свои свойства при эксплуатации слоистого композита может быть материал, представляющий последовательно чередующиеся слои ферро- и диамагнитного материалов. Такой композит может обладать высокой анизотропией магнито- и электропроводности и заранее заданной их величиной в межплоскостном направлении. Применение такого типа композита, например, позволит программно изменять и существенно снижать электромагнитные потери в роторных системах электромашин. Богаты возможности использования слоистых композитов из материалов с различными коэффициентами теплового расширения (термометаллы) в изделиях с необходимой реакцией на изменения тепловых условий эксплуатации.

К материалам с функцией реакции на внешнее воздействие следует отнести и аморфные металлические сплавы [8]. В конце 70-х - начале 80-х годов настоящего столетия установлено, что проникновение атомов водорода в кристаллическую решетку некоторых интерметаллидов при определенных условиях вызывает ее разрушение. Было высказано предположение, что и проникновение атомов металла А в кристаллическую решетку металла В может привести к ее разрушению [9]. Эта идея была заложена в основу диффузионного легирования как метода получения аморфных металлических сплавов. Полагали, что аморфный сплав образуется при низкотемпературном отжиге биметаллической композиции А/В, состав которой по элементам отвечает двум требованиям: во-первых, большая отрицательная энергия смещения атомов А и В и образования аморфного сплава; во-вторых, высокая диффузионная подвижность атомов одной из составляющих в кристаллической решетке другой составляющей и в аморфном сплаве при низкой диффузионной подвижности атомов второй составляющей. Исходя из этих требований была составлена диффузионная пара La/Au (с толщиной слоев 10. . . 60 нм) и проведен ее отжиг при 323. . . 353 К. Прогноз оправдался и повлек за собой разработку многочисленных методов получения аморфных металлических сплавов путем диффузионного и механического легирования: низкотемпературный отжиг биметаллической композиции, интенсивное измельчение и смешивание порошков двух кристаллических металлов, со-

вместное деформирование биметаллической композиции [10]. Оказалось, что этими методами можно также получать пересыщенные твердые растворы, нано- и квазикристаллы. По возможностям и простоте технического решения этому направлению создания конструкционных материалов с чрезвычайно широким спектром структур и свойств альтернативы нет.

Особый интерес к выявлению возможностей создания материалов с совершенствующейся структурой представляется для изделий и конструкций, работающих в активных зонах облучения. В этих условиях материалы подвергаются, кроме обычных тепловой и механической нагрузок, бомбардировке высокоэнергетических частиц и излучений в различных, в том числе агрессивных, средах. В результате упругих и неупругих процессов взаимодействия высокоэнергетических частиц и излучений с твердым телом непрерывно образуются точечные дефекты (вакансии и межузлия), каскадные области нарушений кристаллической решетки, новые элементы - трансмутанты. Исследования действия облучения на материалы позволили обнаружить целый комплекс новых физических явлений, приводящих к изменениям, как правило деградации их исходных характеристик:

- размерным изменениям (распухание, радиационный рост, радиационная ползучесть, изменение рельефа поверхности);
- потере пластичности и повышению температуры вязко-хрупкого перехода (низко- и высокотемпературное охрупчивание);
- ускорению процессов окисления и коррозии под облучением и при взаимодействии материала с теплоносителем, ядерным топливом, продуктами ядерных реакций;
- эрозии поверхности материалов, особенно активных зон термоядерных реакторов (блистеринг, флэкинг, распыление, униполярные дуги);
- локальному и объемному изменению химического состава исходного материала (радиационно-стимулированная сегрегация компонентов сплава, ядерные реакции и имплантация быстрых ионов).

Однако многие радиационные процессы структурно-фазовых превращений и ядерных реакций в материалах можно использовать для совершенствования их структуры и улучшения свойств в процессе облучения. Примером тому служат широко используемые: ионное и ядерно-трансмутационное легирование, радиационная и ионно-лучевая обработка, вакуумноплазменные технологии получения алмазоподобных и других уникальных состояний вещества.

Многие из радиационных эффектов в твердых телах являются следствием ускорения диффузионных процессов и неоднородного распределения потоков точечных дефектов (вакансий, межузельных атомов, атомов примеси) в объеме облучаемых материалов. При разработке и создании новых сталей и сплавов необходимо задавать такое исходное структурно-фазовое состояние, которое бы при облучении самосовершенствовалось и

продлеvalo ресурс работоспособности. Уже достигнутый уровень знаний в изменении структурно-фазового состояния модельных и промышленных сталей и сплавов при облучении (эволюция кластерной и дислокационной структур, сегрегационные эффекты, распад и образование выделений новых фаз, изменение структурно-фазовых диаграмм сплавов и др. [11] позволяет привести примеры создания сталей и сплавов с положительной реакцией на радиационное воздействие. Так установлено, что специальным легированием можно обеспечить при облучении в сталях и сплавах непрерывный, однородный распад твердого раствора с сильно выраженным инкубационным периодом и значительной дилатацией на границах раздела "формирующаяся фаза - матрица". Это сопровождается повышенной рекомбинацией разно-именных дефектов и существенным снижением величины вакансионного распухания, радиационной ползучести и степени охрупчивания [12]. В сложнолегированной аустенитной нержавеющей стали типа X13Ni13 при облучении 3-МэВными ионами хрома до 150 смещений на атом не наблюдается вакансионных пор [13]. Основной причиной такого длительного инкубационного периода процесса вакансионного распухания является возникающая под облучением новая фаза ( $\eta$ -фаза) и ее эволюция с ростом дозы облучения.

Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность существования и создания в металлах и сплавах центров рекомбинации точечных дефектов переменной полярности ("мигающие" стоки) [14]. Ими могут быть либо примесные атомы элементов с радиусом, на 25-30% превышающим атомный радиус основы [15], либо отдельные комплексы [15], либо нарушения когерентности границ раздела [14]. Наличие в материалах таких центров обеспечивает повышенную рекомбинацию генерируемых облучением вакансий и межузельных атомов и, как следствие, снижает степень проявления радиационно-стимулированных эффектов.

Материалы первой стенки термоядерных реакторов, катодной электроники должны быть стойкими по отношению к распылению поверхности при облучении высокоэнергетичными частицами. С этой точки зрения особый интерес представляют сплавы с самопассивирующимися поверхностями за счет радиационно-индуцированной сегрегации специальных элементов ("потеющие" материалы) [16]. Показано, что в условиях ионной бомбардировки сплавы системы Al-Li, Al-Li-Mg, Al-Be-Li, Cu-Li обладают способностью создания на поверхности устойчивого тонкого защитного литиевого слоя. Этот слой непрерывно восстанавливается при облучении за счет радиационно-индуцированной сегрегации лития на поверхности и способствует повышению радиационной и термической стойкости сплава.

Подобный эффект повышения устойчивости саморегулирования по параметрам теплоносителя обуславливается в реакторах PWR применением выгорающих поглотителей в виде напыляемого на топливную таблетку слоя  $ZrB_2$ ,  $Gd_2O_3$  или интегрированного с топливом  $Cd_2O_3$  [17]. В

этих случаях за счет сопутствующего выгоранию топлива выгорание поглотителя обеспечивает баланс между интенсивностью поглощения нейтронов и неотработавшего топлива.

Таким образом, приведенные примеры свидетельствуют о том, что для каждого материала существует присущий ему программный код реакций на внешнее воздействие. В ряде случаев он используется непосредственно в практических целях. Иногда исходный код необходимо модернизировать - подогнать под условия эксплуатации, например, путем легирования изменить температурный интервал проявления эффекта памяти формы или ввести иной программный код, активизирующий процессы сопротивления деградационным явлениям. Познание программного кода материалов, его усовершенствование было и остается основной задачей материаловедов. В одних случаях используется "собственное мышление" материалов, в других - мы закладываем в них "свой" программный код, заставляем "самосовершенствоваться" и повышать его работоспособность в условиях эксплуатации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мацуока Сабуро. Тенденции в разработке "мыслящих" конструкционных материалов. *Metall and Technol* // 1992.-62. - №4. -Р. 56-60.
2. Гарбер Р.И., Гиндин И.А., Неклюдов И.М. Способ термомеханической обработки изделий. Авт. свид. СССР № 161793, 1964; Бюл. изобр. - №8,1964.
3. Камышанченко Н.В. Создание упрочненного состояния металлов путем программного механико-термического воздействия. Дис. ... Л.: Изд-во тех. ун-та, 1991.
4. Гиндин И. А. , Неклюдов И. М. Физика программного упрочнения.-Киев: Наукова Думка, 1979. - 240 с.
5. Камышанченко Н.В. Структура и свойства сплавов. Некоторые вопросы металловедения и прочности. М.: Металлургия, 1993. - 318 с.
6. Бойко В.С., Гарбер Р.И., Косевич А.М. Обратимая пластичность кристаллов. -М.: Наука, 1991.- 280 с.
7. 50 лет Харьковскому физико-техническому институту АН УССР.- Киев: Наукова Думка, 1978. - 320 с.
8. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. - Под ред. Масумото Ц. Пер. с япон. - М.: Металлургия, 1987.-328 с.
9. Schwarz R.B., Johnson W.L. Formation of an amorphous alloy by solid-state reaction of the pure polycrystalline metals. *Phys. Rev. Lett.* - 1983. - 51. - №5. p.415-418.
10. Неверов В. В., Житников Л. Л., Буров В. Н., Ефремов С. С. Образование аморфных сплавов при совместной пластической деформации элементов // Стабильные и метастабильные фазовые равновесия в металлических стеклах. - М: Наука, 1985. - С.44-49.
11. Зеленский В.Ф., Неклюдов И.М., Черняева Т.П. Радиационные дефекты и набухание металлов. - Киев: Наукова Думка, 1988. - 296 с.

12. Паршин А. М. Структура, прочность и повреждаемость коррозионностойких сталей и сплавов. - Челябинск: Металлургия, Челябинское отделение, 1988. - 656 с.

13. Bryk V.V., Voevodin V.N., Neklyudov I.M., Parshin A.M. Point defect recombination enhanced as solid solution decomposer under irradiation. Effects of Radiation on Materials. V.1, 14th Intern. Symp. ASTM, 1990. - P. 295-300.

14. Бакай А.С., Зеленский В.Ф., Неклюдов И.М. Центры рекомбинации точечных дефектов переменной полярности. ЖТФ, 1987. - ж.б.т. - №12. - С.2371-2374.

15. Chen C.W., Buttry R.W. Void formation and denudation in ion-irradiated nickel. Rad. Eff., 1981. - №56. - P. 219-228.

16. Бондаренко Г.Г., Иванов Л.И., Кучерявый С.И. Изучение распыляемости алюминиевых сплавов при ионной бомбардировке // Физика и химия обработки материалов. - 1986. - №5. - С.24-25.

17. Павлов В.И. Анализ нейтронно-физических характеристик топливной решетки ВВЭР-1000 // Атомная энергия. - 1993. - Т.74. - Вып. 1. - С.10-21.

## ПРИРОДА СЛАБОЙ СКЛОННОСТИ К РАДИАЦИОННОМУ РАСПУХАНИЮ ФЕРРИТНЫХ СТАЛЕЙ

А.М.Паршин,  
И.А.Повышев  
(СПбГТУ)

Ранее было показано, что при определенном легировании можно практически подавить радиационное распухание и вакансионное порообразование в аустенитных хромоникелевых сталях [1-3]. Для достижения этого необходимо обеспечить такое состояние пересыщенного твердого раствора, при котором возможно протекание во времени развитого непрерывного распада с сильно выраженным инкубационным периодом и определенной величиной объемной дилатации, а также с формированием упорядоченных структур, К-состояния, расслоения твердых растворов и др. [1,2]. Полагается, что в таких твердых растворах в течение всего процесса роста предвыделения фазы, от зарождения ее до потери когерентности (начало обособления), неизбежно возникают упругоискаженные (растянутые и сжатые) области вокруг предвыделений, в которых осуществляется усиление рекомбинации разноименных дефектов [1-3]. Последующие исследования подтвердили справедливость такого подхода [1-6].

Настоящая работа посвящена дальнейшему изучению природы явления усиления рекомбинации дефектов в конструкционных сплавах и физических путей ослабления их радиационного распухания. Анализируются коррозионностойкие ферритные и суперферритные стали, т.е. материалы с весьма низким содержанием углерода и азота, вакуумный переплав которых осуществляется с применением чистых шихтовых мате-