

ИОННОЕ РАСПЫЛЕНИЕ И ОСОБЕННОСТИ РАСПАДА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ В ИНКУБАЦИОННОМ ПЕРИОДЕ

А.М.Паршин, М.И.Криворук, В.Г.Теплухин, А.В.Мамаев

С.-Петербург, С.-Петербургский государственный технический университет

Одним из основных узлов термоядерного реактора синтеза является разрядная камера, в которой осуществляется реакция синтеза. Наиболее ответственный ее элемент – первая стенка, обращенная к плазме. Кроме того, конструкция камеры включает многочисленные элементы защиты и очистки плазмы, такие, как лимитеры, диафрагмы, диверторные пластины. При взаимодействии высокотемпературной плазмы с поверхностью конструкционных материалов в условиях одновременного воздействия корпускулярных и электромагнитных излучений возможны следующие процессы: образование радиационных дефектов, распыление, радиационный блистеринг и флекинг, активация химических реакций, фазовые и структурные превращения, имплантация атомов изотопов водорода, гелия и остаточных газов.

При поверхностном взаимодействии плазмы с первой стенкой, пластинами дивертора и др. будет иметь место радиационная эрозия металла, которая, с одной стороны, может привести к сокращению ресурса работы реактора, а с другой – продукты эрозии будут охлаждать и отравлять плазму, что приведет к сокращению рабочего цикла разряда, то есть к снижению энергетических характеристик установки.

Различают три основных явления в поверхностных слоях, определяющих процессы эрозии: блистеринг, физическое (ионное) распыление и химическое распыление.

При блистеринге в поверхностном слое образуются и разрушаются газовые пузыри легких и подвижных газов, что приводит к "шелушению" вследствие отрыва от поверхности материала относительно крупных частиц. Экспериментально установлено, что после набора дозы более 10^{17} ион/см² и последовательного "шелушения" нескольких слоев

блистеров (газовых пузырей) процесс эрозии такого типа стабилизируется и дальнейшего "шелушения" не наблюдается [1, 3].

Ионное распыление обусловлено образованием каскадов смещенных атомов вследствие взаимодействия атомов кристаллической решетки в приповерхностном слое с бомбардирующими поверхность ионами газов.

В отличие от физического химическое распыление вызвано образованием химических соединений на поверхности, которые обладают высокими коэффициентами распыления и, следовательно, интенсивно удаляются с поверхности.

Сопrotивляемость поверхности материалов первой стенки эрозии в значительной степени определяет условия горения дейтерий-тритиевой плазмы, так как из-за загрязнения плазмы элементами и их соединениями, поступающими из материала первой стенки, температура плазмы может существенно снижаться, что практически приводит к прекращению реакции термоядерного синтеза.

Таким образом, при разработке материалов для реакторов термоядерного синтеза необходимо одновременно решать задачи высокой сопротивляемости радиационному распуханию (радиационные повреждения во всем объеме материала) и сопротивлению ионному распылению (вопросы химического распыления в данной работе не рассматриваются).

Основой для разработки кандидатных материалов является опыт работы ядерной энергетики, особенно реакторов на быстрых нейтронах. Вопросы ослабления или подавления радиационного распухания достаточно успешно решаются на основе концепции создания в объеме материала условий для аномальной принудительной рекомбинации разноименных радиационных точечных дефектов.

Суть концепции заключается в обеспечении такого состояния пересыщенного твердого раствора, при котором возможен развитый непрерывный однородный распад с сильно выраженным инкубационным периодом и значительной объемной дилатацией на границе раздела "формирующаяся фаза – матрица" [4]. Возникающие при таком распаде упругоискаженные области в кристаллической решетке оказываются способными перераспределять потоки разноименных точечных радиационных дефектов за счет экранирования дальних стоков (дислокаций, границ зерен и т. д.). В случае однородного распада межузельные, более подвижные по сравнению с вакансиями, атомы фактически лишаются предпочтения к дальним стокам и вынуждены рекомбинировать в объемах, заключенных между упругоискаженными областями кристаллической решетки.

Первые успешные эксперименты по подтверждению изложенной концепции были проведены на аустенитных хромоникелевых сплавах типа 20–45 и 20–30 с твердорастворным упрочнением, в которых требуемый распад пересыщенного твердого раствора обеспечивался легированием редкоземельными элементами, однако наиболее перспективными оказались стали и сплавы с дисперсионным типом упрочнения, в которых оказалось возможным практически полное подавление радиационного распухания [2]. Дисперсионно-твердеющие стали и сплавы отличаются от твердорастворноупрочняемых повышенным содержанием титана (или алюминия) с одновременной добавкой редкоземельных элементов. Такой тип легирования позволяет получать пересыщенные твердые растворы с различной интенсивностью распада, т.е. с различным сочетанием сопротивления радиационному распуханию и технологичности.

Работами школы А.М. Паршина была показана общность процессов, протекающих при нейтронном и ионном облучении, в процессе которых возникают множественные каскадные соударения. В случае объемного повреждения (нейтронное облучение) в полной мере прояв-

ляются процессы радиационного распухания, а при ионном облучении, когда все процессы радиационных повреждений сосредоточиваются в приповерхностном слое, – превалируют процессы радиационной эрозии.

Нами установлено, и на ряде разработанных коррозионно-стойких аустенитных хромоникелевых дисперсионно-твердеющих сталей с содержанием никеля от 23 до 12 % убедительно показано, что, учитывая общность процессов повреждаемости, оба явления – и радиационное распухание, и ионное распыление – являются структурно-чувствительными. При соответствующем легировании (и термической обработке) удалось уменьшить коэффициент ионного распыления в 4–5 раз.

В последние годы основное внимание в проблеме радиационной эрозии уделяется именно ионному распылению, поскольку считается, что процессы блистеринга и флекинга после набора определенной повреждающей дозы прекращаются. Однако, если учесть, что ионное распыление наблюдается в течение всего времени эксплуатации первой стенки, непосредственно с момента начала бомбардировки поверхности ионами плазмы, а интенсивность его определяется, как указывалось, структурным состоянием конструкционного материала, то, с нашей точки зрения, это неминуемо приведет к изменению кинетики блистерообразования и флекинга.

Следует ожидать изменения значения предельной интегральной дозы до образования специфического микрорельефа на поверхности и, соответственно, прекращения процесса блистерообразования. С другой стороны, возможно изменение и характера образующегося на поверхности микрорельефа.

Именно структурные превращения, особенно в инкубационном периоде формирования вторичных избыточных фаз, до образования обособленных частиц, определяют поведение конструкционных материалов в условиях интенсивного воздействия нейтронных и корпускулярных потоков.

Таким образом, требуется целенаправленное исследование качественной и количе-

звенной сторон процессов блистеринга с учетом изменения сопротивляемости материала ионному распылению.

Библиографический список

1. Паршин А.М. Структура, прочность и радиационная повреждаемость коррозионно-стойких сталей и сплавов – Челябинск: Metallurgia, 1988. – 556 с.

2. Bullough R., Perrin R.C. The Theory of Void-formation and Growth in Irradiated Materials. Voids Formed by Irradiation of Reactor Materials // Proc. BNES Europ. Conf. Reading, 1971. AERE: Harwell. – P. 79–107.

3. Сопротивляемость радиационному набуханию нержавеющих хромистых и хромоникелевых сталей и сплавов в связи с особенностями формирования вторичных фаз / А.М. Паршин, И.Е. Колосов, Т.Е. Коршунова, М.И. Криворук // Радиационные эффекты в металлах и сплавах: Материалы III Всесоюз. совещ. (Алма-Ата, 30.05–01.06 1983 г.). – Алма-Ата: Наука Каз.ССР, 1985. – С. 178–182.

4. Стойкая к набуханию дисперсионно-твердеющая аустенитная технологичная сталь с низким содержанием никеля / В.В. Брык, В.Н. Воеводин, И.М. Неклюдов, А.М. Паршин, М.И. Криворук, В.Г. Теплухин // Вопр. атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – Харьков: ХФТИ, 1993. – Вып. 1(60). – С. 36–40.

УДК 533.9

МЕХАНИЗМЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ОБЪЕМНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СТЕКЛА $Zr_{53.5}Ti_5Cu_{17.5}Ni_{14.6}Al_{10.4}$

С.А. Бакай¹, И.М. Неклюдов, В.И. Савченко

г. Харьков, НИЦ Харьковский физико-технический институт

Металлические стекла составляют обширный класс перспективных материалов, обладающих уникальными сочетаниями разнообразных свойств (механических, электронных, магнитных и др.) [1]. Этим объясняется сравнительно большой объем их промышленного производства и множественность областей применения. До последнего времени эти материалы получались в виде тонких (толщиной <100 мкм) лент. В последние 10 лет удалось разработать объемные металлические стекла, получаемые при довольно низких (≤ 10 К/сек) скоростях охлаждения расплава. С созданием этого семейства область применения металлических стекол заметно расширилась.

Несмотря на широкое практическое использование металлических стекол, их структура и механизмы пластической деформации остаются предметом интенсивных исследований при отсутствии устоявшихся представлений о микроскопической природе этих механизмов. По своей приро-

де металлические стекла являются неравновесными состояниями метастабильной аморфной фазы, что усложняет проведение исследований и интерпретацию полученных результатов.

Предположения о структурных дефектах, которые являются носителями пластической деформации, весьма разноречивы [2, 3, 4]. Наиболее распространенными на сегодняшний день являются модель свободного объема, модель дислокаций, дисклинаций и поликластерная модель. В поликластерной модели, в отличие от других моделей, основную роль в процессах пластической деформации играет диффузия и скольжение по межкластерным границам.

Ранее проводились исследования механических свойств как образцов металлических стекол в виде тонких лент, так и объемных образцов [5, 6, 7]. В настоящей работе выполнено комплексное исследование объемного пятикомпонентного металлического стекла, результаты которого установ-

¹ E-mail: serg.bakai@kipt.kharkov.ua
http://www.kipt.kharkov.ua