

Радиационные эффекты в конструкционных материалах быстрых реакторов

Радиационные повреждения конструкционных материалов продолжают оставаться одной из наиболее актуальных проблем как при эксплуатации быстрых реакторов, так и при разработке проектов перспективных реакторов-размножителей и термоядерных установок. Это обусловлено тем, что при высоком флюенсе и повышенной температуре, характерных для реакторных установок такого типа, радиационные повреждения могут привести к значительному макроскопическому увеличению объема и формоизменению элементов конструкций, к снижению характеристик длительной прочности и пластичности материалов.

Исследованию радиационных эффектов в конструкционных материалах быстрых реакторов была посвящена международная конференция, проходившая 19—23 июня 1977 г. в Скотсдейле (США). В ней участвовало свыше 100 чел. от всех стран, разрабатывающих реакторы, в том числе трое советских специалистов.

На пленарном заседании конференции рассматривались национальные программы Англии, Франции, ФРГ и США по исследованию радиационных эффектов в материалах, включая обоснование выбора материалов для создаваемых ядерно-энергетических установок. На рабочих заседаниях прочитано свыше 60 докладов о результатах изучения механических свойств, радиационной ползучести, распухания и изменения микроструктуры материалов, а также о прикладной теории радиационных эффектов.

В докладах о национальных программах исследований радиационных эффектов в материалах страны — разработчики быстрых реакторов подтвердили свои решения (программа США существенно корректируется). Для действующих и сооружаемых реакторов «Феникс» и «Супер-Феникс» (Франция), ЕВР II и FRTF (США), JOYO и MONJU (Япония) основным материалом для оболочек твэлов и чехлов пакетов выбрана холоднодеформированная (20%) сталь 316, для PFR (Англия) в качестве конкурирующих с этой сталью рассматриваются холоднодеформированные (20%) стали FV-548 и 321, а также нимонок PE-16. Для оболочек твэлов SNR-300 (ФРГ) выбрана сталь 1.4970 (аустенизация + холодная деформация (15%) + отжиг 800 °С), для чехлов пакетов обсуждается сталь 1.4981. Для перспективных реакторов-прототипов и ядерно-энергетических установок большой мощности изыскиваются новые материалы на основе аустенитной стали с оптимальным легированием, высоконикелевые сплавы и ферритные стали, в том числе с дисперсионным упрочнением.

Для проведения работ по моделированию реакторного облучения широко используются ускорители заряженных частиц и высоковольтные электронные микроскопы. Целями имитационных экспериментов являются получение сравнительных данных о распухании и предварительный отбор радиационно-стойких материалов, а также изучение закономерностей радиационных повреждений.

Радиационное распухание конструкционных сталей продолжает привлекать большое внимание исследователей. Помимо изучения природы самого явления, которое было характерно для первого этапа, в настоящее время интенсивно исследуется влияние легирования основных конструкционных материалов — аустенитных сталей — на распухание. Поиски новых при-

ципов легирования и разработка новых составов на основе аустенитной и ферритной сталей и высоконикелевых сплавов вызваны тем, что полученные в последнее время результаты при имитации облучения на ускорителях традиционной стали до дозы, соответствующей 200—300 смещений/атом, не обнаруживают насыщения в распухании. Облучение в реакторах до флюенса $1,4 \cdot 10^{23}$ нейтр./см² ($E > 0,1$ МэВ) и более подтверждает эти данные и показывает, что зарубежные стали серии 300, например 304, 316 и другие традиционные реакторные, в аустенизированном состоянии имеют значительное распухание. При этом отмечалось, что положительное влияние холодной деформации проявляется в ограниченных режимах облучения.

Для некоторых составов сплавов на основе тройной системы Fe—Cr—Ni установлено существенное влияние на распухание содержания углерода, никеля, стабилизирующих компонентов титана и ниобия, а также кремния, бора, серы, фосфора. Заслуживают особого внимания результаты снижения распухания при легировании кремнием, титаном и бором. Как показало облучение на ускорителях модельных сплавов, благоприятным сочетанием легирующих компонентов радиационное распухание может быть существенно подавлено. Из экспериментов по легированию следует, что распухание зависит от способа получения стали и технологических примесей.

Представленные на конференции данные подтверждают предварительные сообщения о низком распухании никелевых сплавов (PE-16, инколлой 625 и др.) и ферритной стали.

Механические свойства аустенитной стали в докладах на конференции рассмотрены в зависимости от условий облучения, состава и структурного состояния материалов. При этом большое внимание уделено взаимосвязи механических свойств с изменениями микроструктуры. Выявлены особенности влияния облучения на процессы разрушения в трех интервалах: ниже 0,4 температуры плавления происходит упрочнение матрицы и снижение пластичности из-за развития высокой концентрации радиационных дефектов; при температуре образования вакансионных пор и сетки протяженных дислокаций и петель действует новый механизм деформации, приводящий к формированию локальных трещин, которые и снижают разрушающее напряжение; выше 0,6 температуры плавления деформация усложняется радиационно-стимулированным выделением вторичных фаз, а также выделением и коагуляцией гелия, который образуется в результате ядерных реакций. Разрушение здесь обусловлено в основном гелиевым разупрочнением границ зерен.

В докладах обсуждались результаты исследования механических свойств и длительной прочности аустенитных сталей и никелевых сплавов, приводились данные о разгерметизации оболочек твэлов в рабочих условиях, предлагались критерии разрушения и оценки надежности.

К радиационной ползучести вновь привлечено повышенное внимание в связи с обнаруженной корреляцией между ползучестью и распуханием. Установлено, что в режиме распухания скорость ползучести на порядок выше, чем при слабых потоках нейтронов, и может превышать допустимые значения. Как показал эксперимент, ползучесть пропорциональна напряжению и в

отсутствие распухания не зависит от температуры, но возрастает с потоком. Эта зависимость может быть выражена как

$$\varepsilon/\sigma\Phi t = 2,2 \cdot 10^{-12} \text{ МПа}^{-1} (\text{смещений/атом})^{-1}.$$

Деформация ползучести с учетом распухания выражается формулой Болтакса $\varepsilon/\sigma = C\Phi t + DS^\lambda$, где C и D — константы; S — распухание; $\lambda = 0,54$.

Следует отметить, что результаты измерения деформации ползучести разных материалов в различных условиях часто противоречивы и требуют аккуратного подхода к выделению составляющей радиационной ползучести из общей деформации, куда распухание также вносит заметный вклад.

Много вопросов остается за изучением механизмов радиационной ползучести и влияния на нее различных факторов, в том числе структурного состояния материалов и условий облучения.

Для прикладной теории радиационных повреждений материалов, которой на конференции было отведено значительное место, характерно рассмотрение ползучести и распухания в рамках единой модели, основанной на разделении потоков точечных дефектов к различным микроструктурным стокам — дислокациям и порам.

При исследовании влияния облучения на фазовую стабильность показано, что при большом флюэнсе радиационные дефекты запасают энергию, которая существенно сдвигает равновесие и может приводить к появлению фаз, неустойчивых в обычных условиях. Рассмотрены различные молекулярно-кинетические механизмы, приводящие к появлению радиационно-индуцированных нестабильных фаз и к смещению линий фазовой диаграммы.

Представляет интерес предлагаемая компьютерная модель, позволяющая предсказать влияние свойств материала и условий облучения на эволюцию микроструктуры. Эта модель может служить руководством для постановки имитационных экспериментов. В частности, для имитации испытаний ползучести на ускорителях рекомендуется предварительно облучать образцы в реакторе для создания хорошо выраженной микроструктуры, характерной для облученных материалов.

Материалы конференции содержат много полезной информации и фактических данных о влиянии облучения на свойства металлов и конструкционных сталей и, несомненно, представляют интерес для широкого круга специалистов.

БЫКОВ В. Н.

Четвертая сессия советско-американской координационной комиссии по термоядерной энергии

Очередная сессия комиссии, координирующей сотрудничество в области управляемого термоядерного синтеза (УТС), состоялась 1—3 июня 1977 г. в Принстоне (США). Рассмотрев итоги сотрудничества за 1976 г., комиссия отметила, что программа 1976 г. выполнена полностью и дала существенные взаимовыгодные результаты. В целом успешно выполняется и программа 1977 г. При обсуждении проекта программы обменов на 1978 г., а также дальнейших перспектив сотрудничества было признано целесообразным ввести в практику планирование долгосрочных совместных исследований по таким ключевым проблемам УТС, как теоретические исследования и численное моделирование поведения плазмы в системах с магнитным удержанием, разработка методов дополнительного нагрева плазмы в токамаках, разработка сверхпроводящих магнитных систем для крупных термоядерных установок, исследования объемных радиационных повреждений материалов и эффектов взаимодействия плазма — стенка, концепционное проектирование бланкетов термоядерных реакторов, системный анализ термоядерных электростанций.

В качестве основной задачи сотрудничества на ближайший период признано и согласовано проведение совместных работ по изучению удержания плазмы в токамаках [в первую очередь уточнение и сравнение результатов, полученных на токамаках Т-10 (СССР) и РЛТ (США)] и исследование возможностей улучшения удержания плазмы в открытых ловушках.

По сложившейся традиции руководители делегаций Э. Кинтнер (США) и Е. П. Велихов (СССР) представили доклады о результатах, достигнутых за 1976 г. в работах по УТС в обеих странах. После этого состоялась развернутая дискуссия, посвященная анализу дальнейших перспектив развития термоядерной программы в целом.

В сообщениях американской стороны отмечалось, что новая программа решения энергетических проблем США привела к некоторому снижению ассигнований, выделяемых на работы по ядерной энергетике. В частности, уменьшен примерно на 20% и бюджет по УТС. В результате в 1978 финансовом году на работы по УТС выделено 433 млн. долл. (вместо запрошенных 496 млн. долл.), в том числе на системы с магнитным удержанием плазмы 318 млн. долл. и на лазерные и пучковые системы 115 млн. долл.

За год, прошедший после третьей сессии, наиболее существенные результаты в США были получены на токамаках «Alcator», PLT и ORMAK, а также на открытой магнитной ловушке 2ХПВ.

На токамаке «Alcator» (Массачусетский технологический институт) плотность плазмы n удалось довести до 10^{15} см^{-3} при тороидальном магнитном поле 85 кГс. Плазма характеризуется высокой степенью чистоты (эффективный заряд $z_{\text{эфф}} \sim 1$). В результате достигнут рекордный параметр удержания $n\tau = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}$ (τ — энергетическое время жизни плазмы). Завершаются работы по сооружению нового токамака «Alcator-C» с тороидальным магнитным полем 140 кГс. Предполагается, что эксперименты на нем начнутся в январе 1978 г.

На крупнейшем токамаке PLT (Принстон) при плотности плазмы $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и магнитном поле 32 кГс получено $n\tau \sim 10^{13} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}$. До сих пор не удается получить плазму с достаточно малым $z_{\text{эфф}}$ при разрядах в водороде. Плазма содержит большой процент примесей тяжелых элементов, в первую очередь вольфрама, что приводит к существенным радиационным потерям энергии. Изучение проблемы примесей составляет в настоящее время основу программы исследований на PLT. Вместе с тем ведется подготовка к экспериментам с инжекцией в плазму пучков быстрых нейтральных