

(по граням и ребрам). В случае оболочек твэлов это объясняется изменением температуры под влиянием изменений проходных сечений для потока натрия вследствие отхода и перемещения дистанционирующей проволоки вдоль твэлов, в случае чехлов тепловыделяющих сборок из холоднодеформированной стали 316 — большей степенью холодной деформации у ребер, чем у граней, а также увеличенным распуханием и ползучестью некоторых граней из-за искажения распределения нейтронного потока и давления на них пучка твэлов. Давление пучка твэлов на чехол сборки вызвано оваллизацией оболочки в результате воздействия дистанционирующей проволоки и закручиванием по спирали пучка твэлов. Все эти факторы приводят к изгибу пучков твэлов и чехлов тепловыделяющих сборок. Максимальное отклонение верхней головки такого чехла после облучения в «Фениксе» до 81 смещ./атом составило 45 мм. Особое внимание обращалось на высокий уровень напряжений, возникающих к концу кампании в оболочках твэлов за счет давления топлива, особенно карбидного (до 350 МПа).

Значительный интерес вызвало сообщение французских специалистов о произошедшем в мае 1979 г. первом

за четыре года эксплуатации «Феникса» случае разгерметизации твэлов (или одного твэла) с выходом твердых и газообразных продуктов деления. Продолжительность останова реактора с момента разгерметизации до обнаружения и выгрузки дефектной сборки составила несколько часов.

В области фундаментальных исследований основное внимание было уделено экспериментальному и теоретическому изучению радиационно-стимулированного образования сегрегаций в разбавленных и концентрированных твердых растворах, а также развитию моделей гетерогенного зарождения пор с учетом появления атомов газа и каскадов смещений. В сплавах Ni — Cu, Ni — Si и Ni — Ge при облучении электронами, нейтронами и ионами никеля происходит резкое перераспределение компонентов. Скорость установления и абсолютное значение равновесной концентрации значительно зависят от температуры облучения и характера распределения повреждений, а направление перераспределения определяется типом радиационных дефектов (вакансий или межузельных атомов), участвующих в переносе данного компонента.

ОНУФРИЕВ В. Д.

Международная конференция по фундаментальным механизмам радиационно-индуцированной ползучести и роста

8—10 мая 1979 г. в Чок-Риверских ядерных лабораториях фирмы «Атомик энерджи оф Канада» состоялась первая специализированная конференция по данной тематике с участием 86 специалистов из 10 стран. Было представлено свыше 40 докладов, примерно половина которых была заслушана на пленарных заседаниях.

Труды конференции свидетельствуют о значительных успехах как в разработке теоретических представлений механизмов радиационной ползучести и роста, так и в экспериментальном исследовании этих процессов применительно к разнообразным реакторным материалам (цирконий и его сплавы, графит, аустенитные нержавеющие стали, никель, медь и их сплавы, уран, UO_2 , (U, Pu)C).

Широкое распространение получили имитационные исследования радиационной ползучести, радиационного роста и распухания облучением заряженными частицами. В некоторых случаях в качестве источника электронов энергией 1 МэВ используют высоковольтные электронные микроскопы, что позволяет одновременно исследовать тонкую структуру облучаемого материала. Облучение α -частицами энергией до 60 МэВ дает возможность вводить дозированное количество гелия для имитации условий облучения как в быстром, так и в термоядерном реакторах. В Лос-Аламосской научной лаборатории США облучение протонами энергией 800 МэВ использовали для создания равномерного радиационного повреждения в массивных образцах, подвергаемых циклическому нагружению в целях проверки возможности подавления вакансионного распухания аннигиляцией вакансий при колебательном движении дислокаций.

Механизмы радиационной ползучести базируются на предположении анизотропности потоков образующихся межузельных атомов и вакансий к различным стокам и анизотропном поведении таких стоков в поле напряжений. Наиболее часто для описания процесса используют либо механизм преимущественной абсорбции вакансий или межузельных атомов дислокациями и дислокационными петлями с различной пространственной ориентацией (механизм SIPA), либо механизм неравновреготной образования зародышей плоских скоплений точечных дефектов (механизм SIPN), либо механизм, дополнительно учиты-

вающий возможность переползания линейных или двумерных дефектов через препятствия и скольжения этих дефектов по определенным кристаллографическим плоскостям (механизм SICG). Корреляционные зависимости плотности петель и линейных дислокаций от дозы облучения и температуры могут быть применены для надежного прогнозирования, поскольку скорость радиационной ползучести обычно хорошо описывается на основе механизма SIPA, особенно при флюенсе свыше 10^{20} нейтр./см² ($E > 1$ МэВ). В случае стали 316 при низком напряжении превалирует механизм SIPA, и скорость ползучести $\dot{\epsilon}$ линейно зависит от напряжения σ . При более высоком напряжении начинает преобладать механизм SICG, согласно которому $\dot{\epsilon} \sim \sigma^2$. Полученные в Юлихе (ФРГ) экспериментальные данные для отожженной стали 316 показали, что при 250 МПа вклад обоих механизмов примерно одинаков. По мнению канадских исследователей, радиационная ползучесть циркония и его сплавов вызвана переползанием и скольжением дислокаций преимущественно по призматическим плоскостям (1010) и в ограниченной степени (~20%) по базисным плоскостям (0002).

Радиационный рост большинство авторов связывают с механизмом SIPA, эффективность которого резко зависит от характера и анизотропии микроструктуры. В Чок-Риверских лабораториях разработана модель для описания изменений размеров изделий из циркониевых сплавов в процессе облучения при температуре ниже 600 К и напряжении не выше 150 МПа, когда эффекты, связанные с воздействием быстрых нейтронов, играют доминирующую роль. Согласно этой модели, радиационный рост вызван процессом переползания существующих дислокаций с вектором Бюргерса $1/3 \langle 1120 \rangle$ за счет абсорбции межузельных атомов и увеличением размера в направлении $\langle 1120 \rangle$. Абсорбция вакансий на границах вызывает «усадку» зерен в перпендикулярном направлении.

По мнению американских исследователей фирмы «Бабкок — Уилкоккс», необходимо учитывать взаимодействие механизмов ползучести и роста, поскольку оно может увеличивать скорость указанных процессов.

Канадские специалисты сопоставили окружную и продольную деформацию труб высокого давления, изготовленных по восьми вариантам технологии из холоднодеформированного циркаллойа, после их эксплуатации в реакторах АЭС «Пиккеринг» и «Дуглас Пойнт», в Ханфордском реакторе «N» (США) и Уинфритском реакторе SGHWR (Великобритания). Скорость окружной деформации исследованных канальных труб (нормированная на 1 Па и 1 нейтр./м² ($E > 1$ МэВ) варьировали от -9 до $+14,3 \cdot 10^{-29}$, скорость осевой деформации — от 5,2 до $15,8 \cdot 10^{-29}$. Скорость радиационного роста оказалась пропорциональной плотности дислокаций и возрастала по мере увеличения длины зерен и уменьшения доли базисных полюсов в данном направлении. Радиационно-индуцированная ползучесть в меньшей степени чувствительна к плотности дислокаций. В случае канальных труб, работающих под давлением, увеличение доли базисных полюсов в радиальном направлении приводит к возрастанию окружной и снижению осевой скорости ползучести.

Проведенные в Великобритании исследования радиационного роста циркаллойа и сплава Zr — 2,5% Nb при температуре 353—553 К показали, что при флюенсе до $\sim 10^{20}$ нейтр./см² ($E > 1$ МэВ) наблюдается весьма высокая скорость радиационного роста, абсолютное значение и знак которой зависели от текстуры и температуры. При дальнейшем облучении деформация роста холоднодеформированного циркаллойа-2 и отожженного сплава Zr — 2,5% Nb изменялась по линейному закону, а для отожженного циркаллойа-2 — по параболическому и имела тенденцию к «насыщению». Результирующая деформация радиационного роста при циклическом изменении температуры в интервале 353—553 К определялась конечной температурой и при небольшом флюенсе была обратимой. При высоком флюенсе возникала необратимая деформация, которая не могла быть устранена отжигом при более высокой температуре. Предложена модель для объяснения этих стадий радиационного роста.

Обычно процессе радиационного роста связывают лишь с изменением формы материала. Английские и канадские исследователи на примере циркаллойа показали, что при этом возможно и некоторое увеличение объема $\sim 0,1\%$ после облучения до флюенса $2 \cdot 10^{21}$ нейтр./см² или электронами энергией 1 МэВ до ~ 10 смещ./атом. Изотропный радиационный рост при 598 °С образцов сплава циркония с алюминием (8,6 и 9,4 масс.%) также сопровождался уменьшением плотности.

Из материалов с г. ц. к.-решеткой наиболее широко была исследована нержавеющая сталь 316 (Cr — 1,5%, Ni — 13%, Si — 1%, Mo — 1,5%). Радиационная ползучесть этой стали определяется как исходной микроструктурой, так и локальным выделением новых фаз. Вакансионное распухание также зависит от исходной микроструктуры, причем экспериментально была установлена связь между распуханием и радиационной ползучестью. При высоком флюенсе ползучесть ускоряется, несмотря на достижение видимого динамического равновесия дислокационной структуры, если судить по плотности дислокаций. Подобное равновесие является кажущимся, поскольку каждая образующаяся петлевая дислокация проходит по мере развития весь диапазон размеров, а характер распределения петель по размеру не зависит от флюенса. По мнению некоторых исследователей, в процессе облучения может меняться диффузионная подвижность точечных дефектов вследствие развития локальной химической неоднородности и образования новых фаз, некоторые из них (например, Ni₃Si) возникают лишь в условиях облучения. Влияние примесей на радиационную ползучесть было выявлено на примере стали 316 с минимальным содержанием неметаллических примесей, для которой по сравнению с обычной коммерческой сталью 316 скорость ползучести была в 4 раза выше. Процессы радиационного роста и ползучести связаны с изменением дислока-

ционной структуры материала в процессе облучения. В частности, при облучении нержавеющей стали 316 в напряженном состоянии на фоне общего роста плотности дислокационных петель Франка наблюдалось уменьшение концентрации таких петель по некоторым кристаллографическим плоскостям по сравнению с облучением при отсутствии напряжений.

Изучение внутривремени релаксации напряжений для многих конструкционных материалов с г. ц. к.-решеткой в интервале температуры 320—570 К при интенсивности потока $1,5 - 2,1 \cdot 10^{13}$ нейтр./(см²·с) ($E > 1$ МэВ) привело канадских исследователей к выводу, что скорость релаксации при 320 К либо такая же, как при 570 К, либо снижается не более чем в 3 раза. Поскольку при меньшей температуре резко уменьшается подвижность вакансий, то предполагается, что вакансии не должны играть существенной роли в механизмах ползучести подобных материалов для данного интервала температуры.

Исследование радиационной ползучести холоднодеформированных нержавеющих сталей En 58, FV 548 и 316 в быстром реакторе (Дунрей, Великобритания) показало, что в интервале 240—360 °С скорость ползучести, нормированная на 1 смещ./атом, возрастает с уменьшением интенсивности потока быстрых нейтронов (увеличение времени облучения) и повышением температуры.

Часть докладов касалась поведения ядерного топлива. Так, при облучении отожженного α -урана протонами энергией 3,5 МэВ деформация радиационного роста при 100 °С линейно зависела от дозы в диапазоне до $7 \cdot 10^{-3}$ смещ./атом, скорость роста (нормированная на единицу дозы) составила $(5,6 - 7,4) \cdot 10^{-3}$. Примерно такая же скорость радиационного роста ($5 \cdot 10^{-3}$) наблюдалась в случае облучения α -урана в реакторе при 80 °С. Исследования при помощи высоковольтного электронного микроскопа свидетельствовали об идентичности характера радиационного повреждения в α -уране после облучения протонами и нейтронами.

Японские исследователи подтвердили данные («Joint of Nucl. Materials», 1975, в. 56, р. 279) об аномально высокой скорости радиационной ползучести UO₂ при флюенсе 10^{19} дел./см² и предложили механизм ползучести, основанный на вариации концентрации вакансий в UO₂. Наблюдаемая повышенная скорость ползучести UO₂ при переходных режимах объясняется присутствием дополнительных «динамических» вакансий.

Проведенными в Карлсруэ (ФРГ) исследованиями установлено, что радиационная ползучесть уран-плутониевого карбидного топлива в 10 раз ниже ползучести окисного топлива. В этих экспериментах деформация столбика из четырех таблеток UC — 15% PuC непрерывно регистрировалась микроволновым резонансным методом с точностью ~ 1 мкм. Скорость радиационной ползучести в интервале 500—720 °С линейно зависела от напряжения и интенсивности делений, но не зависела от степени выгорания ($0 \leq B \leq 10\%$) и температуры. Скорость распухания также линейно зависела от степени выгорания и интенсивности делений и не зависела от температуры. Относительное увеличение объема на 1% выгорания описывается соотношением

$$\delta V = 1,17 \pm 0,17 B.$$

В Чок-Риверских лабораториях измерена радиальная деформация оболочек твэлов из циркаллойа (сердечник из UO₂) по всей их длине в процессе испытания в петлевом канале с водой под давлением в реакторе NRX. Варьируя давление ³He от 0 до 1,2 МПа в трубке небольшого диаметра, навитой без зазоров снаружи на канальной трубе в пределах высоты испытываемого твэла, можно было изменять линейную мощность от 300 до 600 Вт/см со скоростью 10—30 Вт/(см·с), чтобы имитировать влияние скачков мощности на взаимодействие окисного топлива с оболочкой.

Доклады будут опубликованы.

ИВАНОВ А. Н.