

## Симпозиум по радиационным повреждениям в реакторных материалах

В июне 1969 г. в Вене проходил симпозиум по радиационным повреждениям в реакторных материалах, организованный МАГАТЭ. В симпозиуме приняли участие представители 17 стран и 2 международных организации. Было заслушано 56 докладов, затронувших наиболее существенные проблемы современного радиационного материаловедения. Доклады были распределены по следующим секциям: фундаментальные процессы, методы и их применение; радиационное упрочнение, разрушение и ползучесть; модели повреждений и влияние спектра нейтронов; образование пор; инертные газы в твердых телах; топливные материалы и графит.

Сами названия секций показывают, что симпозиум ориентировался на рассмотрение скорее прикладных, чем теоретических вопросов. Вместе с тем уровень многих докладов таков, что технические характеристики материалов рассматриваются с позиций микромеханизмов радиационного повреждения.

Среди проблем, рассмотренных в той или иной мере в докладах симпозиума, пожалуй, одно из центральных мест занимает проблема высокотемпературного радиационного охрупчивания аустенитных сплавов. Несмотря на некоторые отличия в трактовке наблюдаемых явлений, которые можно отметить в докладах, продолжает господствовать точка зрения, что причиной высокотемпературного охрупчивания является образование пузырьков, заполненных инертными газами (доклады, представленные Великобританией, ФРГ, США). Вместе с тем большой интерес вызвал доклад, представленный Советским Союзом; в нем высказана иная точка зрения на механизм охрупчивания аустенитных сплавов, связывающая последнее с интенсификацией диффузионных процессов под действием облучения, приводящей к существенному перераспределению примесей, которое во многих случаях ведет к охрупчиванию материала. Можно полагать, что эти точки зрения не являются альтернативными — оба механизма имеют место и соотношение между ролью того или другого механизма зависит от конкретных условий (состав сплава, температура и интенсивность облучения).

Если проблема высокотемпературного охрупчивания материалов возникла уже сравнительно давно (первые публикации появились в 1962—1963 гг.), то проблема распухания конструкционных материалов под действием высоких интегральных потоков при повышенных температурах возникла сравнительно недавно в связи с необходимостью использования конструкционных материалов при облучении потоками  $> 10^{22}$  нейтр/см<sup>2</sup>. Зависимость распухания от интегрального потока носит критический характер, интенсив-

ное распухание начинается при дозах  $\sim 10^{22}$  нейтр/см<sup>2</sup> и достигает нескольких процентов по объему. Электронномикроскопические исследования показывают, что распухание обусловлено возникновением радиационной пористости за счет значительного пересыщения вакансиями при высоких дозах облучения. В одном из докладов (США, SM-120/F-4) был рассмотрен механизм образования радиационной пористости и было показано, что кинетика порообразования может быть описана теорией гомогенного зарождения. Это позволило проанализировать влияние некоторых факторов, как внешних (температура, поток), так и присущих самому материалу (энергия образования и миграции вакансий), на кинетику порообразования. Эти исследования являются попыткой наметить пути для управления радиационной пористостью за счет легирования, изменяющего некоторые характеристики материала (поверхностная энергия, энергия образования и миграции вакансий), а также путем выбора наиболее оптимальной температуры эксплуатации материалов.

При теоретическом рассмотрении порообразования обычно используется континуальная модель, которая не дает хорошего приближения при исследовании пор малого размера, состоящих из нескольких вакансий. В докладе SM-120/F-8 для исследования стабильности малых пор и их взаимодействия между собой применена дискретная модель кристалла железа, что позволило исследовать стабильность малых плоских и сферических скоплений вакансий, представляющих собой либо поры, либо газовые пузырьки.

Теоретическое рассмотрение процесса распухания металлического топлива (доклады SM-120/F-7, F-9) показало, что на процесс образования и роста газовых пузырьков существенное влияние оказывают напряжения, связанные как с существованием самих пузырьков, так и с внешним давлением. Экспериментальное исследование низколегированных сплавов урана показывает, что внешнее давление может существенно уменьшать скорость распухания.

Характерно, что радиационная пористость (в наибольшей степени свойственная аустенитным сплавам) проявляется не для всех материалов. В частности, некоторые сплавы на основе ванадия (доклад ФРГ SM-120/G-4) не подвержены образованию радиационной пористости и поэтому рассматриваются некоторыми специалистами как весьма перспективные для использования в качестве оболочек тепловыделяющих элементов быстрых реакторов.

Таким образом, поведение инертных газов в материалах, как делящихся, так и конструкционных, является одной из существенных проблем радиационного

материаловедения. Эта проблема, вероятно, вызовет наибольшие затруднения при использовании материалов в высокопоточных энергетических реакторах, в особенности быстрых реакторах. В последних температуры оболочек и конструкций находятся в интервале температур 500—700°С и в наибольшей степени проявляются эффекты, вызванные образованием газовых пузырьков.

Существенное внимание на симпозиуме было уделено вопросам количественной оценки и предсказания повреждения материалов при облучении в различных спектрах. Здесь было представлено три различных направления, три подхода к решению этого вопроса.

Первый — достаточно традиционный подход — это оценка скорости рождения дефектов при использовании одной из моделей радиационного повреждения и достаточно точно рассчитанных спектров потоков нейтронов, нормированных с помощью пороговых индикаторов. Как было показано в нескольких докладах, посвященных исследованию радиационного повреждения в графите, такой подход для графита вполне оправдан и дает хорошее приближение при сравнении результатов, полученных в разных реакторах (доклады SM-120/E-6, E-7).

Однако, как было показано в докладе SM-120/E-2, представляющем новое направление оценки радиационного повреждения, элементарные функции повреждения, основанные на теории парных соударений, не всегда могут быть использованы. В последней работе сделана попытка восстановления функции повреждения стали по результатам облучения в различных спектрах и было показано, что функция повреждения значительно отличается от любой функции, рассчитанной теоретическим путем. Естественно, применение такой функции повреждения ограничено узкими рамками рассматриваемого свойства, однако применение ее при оценке механического поведения, например, материалов корпусов реакторов весьма перспективно.

Наконец, третье направление, представленное докладом SM-120/E-1, основано на вычитении радиационного повреждения с помощью математического моделирования. Работа, представленная на симпозиум, не была доведена до стадии предсказания механических свойств, но были приведены расчеты движения дислокаций в кристалле, содержащем барьеры радиационного происхождения. Если этот метод будет доведен до своего завершения, в чем убежден автор доклада, то он сулит перспективы существенного сокращения объема некоторых экспериментальных работ по выяснению влияния спектра излучений или, во всяком случае, позволит делать предварительные расчеты, облегчающие выбор правильного направления исследований.

В последнее время привлекла к себе большое внимание проблема радиационной ползучести в связи с использованием сплавов циркония для несущих конструкций реактора и расширением диапазона температур, в котором используются материалы. Проблеме ползучести и разрушения была посвящена отдельная секция, среди докладов которой заслуживает внимания работа, представленная Великобританией (SM-120/D-3); она посвящена исследованию корреляции между радиационным ростом сплавов циркония и их радиационной ползучестью. Показано, что существует количественная связь между ростом и ползучестью циркония, которая позволяет объяснить ряд противоречий, наблюдавшихся ранее при различных методах испытания циркониевых сплавов в реакторе. Корреляции между радиационным ростом и ползучестью был также посвящен доклад «О радиационной ползучести урана и графита»,

представленный Советским Союзом. На этой же секции были представлены доклады, посвященные инженерным проблемам, связанным с ползучестью материалов в реакторе. В частности, рассмотрены методы расчета ресурса оболочек тепловыделяющих элементов с учетом эффекта ползучести.

При рассмотрении вопросов радиационного упрочнения основное внимание было уделено природе упрочнения и охрупчивания легированных материалов, так как исследования последних лет показывают, что закономерности, полученные на чистых материалах, не всегда можно применять к материалам техническим, в которых примеси играют существенную роль в образовании и поведении дефектов. Центральным в этом аспекте был доклад SM-120/C-1, в котором проведен детальный анализ влияния примесей на радиационное упрочнение гранецентрированных и объемноцентрированных металлов. При этом для гранецентрированных металлов рассматривалось действие примесей, обладающих высокой растворимостью (например, сплав медь — золото), а для объемноцентрированных (ниобий, молибден, железо) рассматривалось влияние примесей внедрения. В этой работе достаточно убедительно показано, что функциональные зависимости между изменением механических свойств и дозой облучения при различном содержании примесей и разной температуре могут претерпевать существенные отклонения от принятых на основании данных исследования чистых металлов.

Характерной чертой многих докладов, посвященных радиационному упрочнению, является широкое привлечение электронной микроскопии, в частности представляет интерес исследование (доклад SM-120/C-2) механизма радиационного упрочнения ниобия, где с помощью электронного микроскопа изучалось явление так называемого каналирования дислокаций при деформировании облученного ниобия.

Хотя наиболее существенные вопросы, связанные с повреждением топливных материалов (вопросы распухания топлива и поведения газообразных осколков деления), рассматривались на соответствующих секциях, была организована специальная секция «топливо и графит», где были представлены доклады, посвященные поведению металлического топлива и микро-топлива с покрытием из пироуглерода. Рассмотрение при этом проводилось главным образом в аспекте влияния технологии изготовления на поведение топлива.

В отношении металлического топлива представляет интерес доклад SM-120/H-1, посвященный исследованию распухания низколегированных сплавов урана, в частности сплавов урана с молибденом и алюминием, среди которых сплав  $U + 1,1\% Mo + 0,05\% (AlSn)$  обнаружил очень слабую зависимость распухания от температуры в области температур до 550°С, и по абсолютной величине распухание было в несколько раз меньше, чем для сплава, легированного только молибденом.

Не случайным является объединение в одной секции докладов по высокотемпературному микро-топливу и графиту. Это, очевидно, связано с интенсивными работами в области высокотемпературных реакторов с газовым охлаждением. Как показывают результаты, изложенные в докладах SM-120/H-4, H-5, H-6, H-8, в области усовершенствования технологии топлива с покрытием из пироуглерода и создания радиационно-стойкого при высоких температурах графита достигнуты определенные успехи.

Ввиду явно прикладной направленности симпозиума фундаментальным исследованиям было посвящено сравнительно немного докладов, касающихся в основном кинетики отжига радиационных дефектов и неко-

торых новых методов исследования. В этом отношении весьма интересны результаты изучения влияния внешнего давления на кинетику отжига дефектов в молибдене. Оказалось, что приложение внешнего давления величиной до 70 кбар может ускорить отжиг радиационных дефектов до такой степени, что скопления, разрушающиеся в обычных условиях при температуре около 500° С, исчезают уже при комнатной температуре. Изучение этого нового явления, по-видимому, может дать полезные сведения относительно различий в поведении дефектов в чистых материалах и материалах, содержащих большое число несовершенств, включений

или выделений, создающих локальные поля высоких напряжений.

Таким образом, представленная весьма краткая информация показывает, что на симпозиуме по радиационным повреждениям в реакторных материалах были обсуждены весьма разнообразные аспекты современного радиационного материаловедения, и знакомство с докладами, сборник которых МАГАТЭ предполагает издать, будет полезным широкому кругу специалистов, работающих как в области атомной техники, так и в области исследования дефектов в кристаллах.

П. А. ПЛАТОНОВ

## Конференция по ядерным реакциям, вызываемым тяжелыми ионами

В Международная конференция по ядерным реакциям под действием тяжелых ионов состоялась в Гейдельберге в июле 1969 г. В конференции приняли участие около 300 человек. Ее программа включала следующие основные разделы: 1) теоретическая интерпретация взаимодействия тяжелых ионов с ядрами, включая проблему ядерных квазимолекул; 2) механизм реакций передачи нуклонов и нуклонных групп; 3) передача  $\alpha$ -частиц в ядерных реакциях с ионами лития и вопросы  $\alpha$ -ассоциирования в легких ядрах; 4) кулоновское возбуждение, измерение магнитных и статических квадрупольных моментов возбужденных состояний ядер; 5) синтез трансменделеевских элементов. Возможности существования и синтеза элементов в новой области стабильности. Поиск сверхтяжелых элементов в природе; 6) проекты новых ускорителей тяжелых ионов.

Уже из этого перечня видно, насколько обширной была конференция. В самое ближайшее время читатель сможет лично ознакомиться с трудами конференции. Поэтому остановлюсь только на самых интересных и важных, на мой взгляд, научно-технических новостях.

Значительное место в программе конференции занимали реакции передачи и среди них прежде всего реакции передачи  $\alpha$ -частицы. Интерес к этим реакциям вызван тем, что, изучая, например, реакции подхвата  $\alpha$ -частиц, можно получить информацию об  $\alpha$ -ассоцировании нуклонов в основном состоянии ядра.

Особенно удобными для этой цели оказались ускоренные ионы лития. Реакции ( ${}^6\text{Li}, d$ ) и ( ${}^7\text{Li}, t$ ) напоминают реакции срыва с дейтронами, с той лишь разницей, что ядру мишени передается не отдельный нуклон, а  $\alpha$ -частица. Эксперименты с ионами лития проводятся в СССР (ОИЯИ, ФРГ и Франции). Большой экспериментальный материал по этому разделу был представлен на конференции в докладе А. А. Оглоблина (ИАЭ им. И. В. Курчатова, Москва). С обстоятельным докладом по теории  $\alpha$ -ассоцирования в легких ядрах выступил В. Г. Неудачин (МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва). В Гейдельберге изучались обратные реакции ( $d, {}^6\text{Li}$ ) и ( ${}^3\text{He}, {}^7\text{Be}$ ) с целью получения данных о приведенных  $\alpha$ -ширинах основных состояний легких ядер.

Сопоставление результатов, полученных в отдельных лабораториях, показывает, что при передаче  $\alpha$ -частицы происходит возбуждение вращательных полос ( $0^+, 2^+, 4^+, 6^+$ ). Эти данные раскрывают структуру уровней, помогают понять природу  $\alpha$ -ассоцирования и деформации возбужденных состояний легких ядер. В докладе А. Бромли (Йельский университет, США)

рассматривалась проблема ядерной молекулы. В 1960 г. в опытах по рассеянию  ${}^{\text{C}}12$  на  ${}^{\text{C}}12$  при энергиях вблизи кулоновского барьера была обнаружена периодическая структура в функциях возбуждения различных каналов реакций и начала упругого рассеяния. Эта структура была интерпретирована как результат образования ядерной квазимолекулы. Однако при рассеянии  ${}^{\text{O}}16$  на  ${}^{\text{O}}16$  и  ${}^{\text{N}}14$  на  ${}^{\text{N}}14$  такой структуры не наблюдалось. С пуском первого тандем-генератора, на котором удалось ускорить ядра  ${}^{\text{O}}16$  до 80 Мэв, периодическая структура сложного характера была обнаружена и при упругом рассеянии  ${}^{\text{O}}16$  на  ${}^{\text{O}}16$ . Пока не найдено удовлетворительного теоретического описания наблюдаемой структуры.

Большой интерес вызвало сообщение В. В. Волкова (ОИЯИ, Дубна), который рассказал о синтезе новых изотопов легких элементов с аномально большим избытком нейтронов  ${}^{\text{O}}22$ ,  ${}^{\text{N}}20$ ,  ${}^{\text{C}}18$ , а также привел данные о новом механизме взаимодействия тяжелых ионов с ядрами, промежуточном между компаунд-ядром и квазиупругими прямыми процессами.

Из новых сообщений хочется еще отметить доклад, представленный из Копенгагена, о расчетах эффективных сечений деления урана кулоновским полем тяжелых ионов от кислорода до ксенона.

Большое место на конференции было отведено обсуждению проектов новых ускорителей тяжелых ионов. В обзорном докладе Р. С. Ливингстона (Ок-Ридж, США) были рассмотрены основные проблемы ускорения тяжелых ионов (выбор схем ускорения, получение ионов высокой зарядности, сравнительная экономичность различных схем и т. д.) и дана краткая характеристика существующих ускорителей и перспектив их дальнейшего развития. Из приведенных данных можно было сделать вывод, что лучшими машинами по интенсивности и ассортименту ускоряемых частиц являются два циклотрона Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ (310-см и 200-см). В докладе отмечалась перспективность коллективного метода ускорения тяжелых ионов, разрабатываемого в ОИЯИ В. П. Саранцевым и др., а также перспективность нового типа ионных источников, разработанного в Дубне группой Е. Д. Донца; с помощью этого источника удалось получить девятнадцатизарядные ионы золота.

Далее обсуждались многочисленные проекты ускорителей тяжелых ионов, разрабатываемые в США, Франции и ФРГ (суперхайлак в Беркли, двоянный тандем в Кембридже, ускорители в Аргонне и Ок-Ридже, в которых в качестве инжектора используется