

давлении, превышающем давление магнитного поля, а также когда советскими физиками была высказана идея амбиполярных магнитных ловушек, вновь резко возрос интерес к незамкнутым магнитным системам. В СССР и США в ближайшее время начнутся эксперименты по проверке теории удержания плазмы в амбиполярных ловушках. Подобные системы представляют обычную ловушку с магнитными пробками, но к каждой пробке присоединено еще по одной ловушке. В крайних ловушках создается плазма, плотность которой превышает плотность в центральной ловушке, и вследствие этого возникает потенциальный барьер, удерживающий ионы в центральной ловушке. Причем время удержания может возрасти во много десятков раз по сравнению с обычной открытой ловушкой. В случае положительных результатов проверки появится возможность создания энергетического реактора, конструктивно более простого по сравнению с замкнутыми системами. Предварительная инженерная проработка реакторов на основе амбиполярных систем уже ведется в некоторых странах.

Последние работы по тета-пинчам в основном посвящены нагреву плазмы в продольном магнитном поле традиционными методами и инжекцией релятивистских электронных пучков и встречных плазменных сгустков. Новый метод нагрева в системах такого типа (СССР) позволил при торможении встречных плазменных потоков получить при плотности плазмы $\sim 10^{15}$ см⁻³ температуру ионов (в результате термализации энергии сгустков) ~ 1 кэВ. В одной из работ (СССР) показано экспериментально, что в малом объеме соленоида может существовать достаточно долго поле мегагаусного диапазона.

В работах по плазменному фокусу (СССР) убедительно показано, что такая система представляет плазменный индуктивный накопитель с плазменным размыкателем и генерирует пучки электронов и ионов при длительности импульса $\sim 10^{-8}$ с (мощность 1 ТВт). Число ускоренных ионов достигает $10^{15} - 10^{16}$ при энергии 1—1,5 МэВ. Потоки электронов фокусируются до размера 1 мм, а это обеспечивает плотность потока энергии на мишени более 10^{13} Вт/см². При облучении лазером плазмы, образующейся в плазменном фокусе в определенный момент фазы сжатия, наблюдается максимальное поглощение излучения, дающее рост выхода нейтронов в 1,5—2 раза.

Использование плазменных ускорителей для получения высокоэнергетической плазмы и заполнения магнитных ловушек рассматривается как один из возможных

путей создания реакторной системы. В настоящее время удалось создать (СССР) ускорители на ток до 0,5 МА (при длительности 100 мкс) и энергию 0,1 кэВ. Вместе с тем различные плазменные ускорители, первоначально разработавшиеся в рамках программы УТС, нашли сейчас широкое применение в качестве плазменных движителей космических аппаратов, при обработке твердых тел и в других областях техники.

Успешно развиваются работы по лазерному термоядерному синтезу. За последний год получены новые экспериментальные данные о взаимодействии мощного излучения (при энергии ~ 100 Дж) с плазменной короной твердой мишени, в первую очередь по поглощению потоков энергии лазера плотностью $10^{13} - 10^{16}$ Вт/см². Однако все еще не ясны процесс переноса тепла, природа образования быстрых частиц, генерации сверхсильных магнитных полей и т. п. Высокого уровня достигло развитие мощных лазерных систем (неодимовых и СО₂) с автоматизированным управлением, что позволило создать установки с лазерным лучом энергией до 10 кДж и начать эксперименты по облучению микромишеней при энергии ~ 1 кДж и выше.

Корпускулярная диагностика оказалась весьма эффективным средством измерения параметров ионного компонента высокотемпературной плазмы, позволяющим получать информацию о процессах нагрева и охлаждения ионов. В настоящее время на многих установках применяются пассивные (анализ потока частиц из плазмы) и активные (инжекция пробного пучка атомов в плазму с последующим анализом атомов, рассеянных на ионах плазмы, и ионов плазмы, перезарядившихся на пучке) методы корпускулярной диагностики. Разработанные в СССР многоканальные анализаторы с магнитной разверткой позволяют анализировать частицы по энергии и массе за один рабочий разряд. Они успешно применяются на некоторых зарубежных установках. Проведены опыты по определению концентрации примесей (ионов кислорода и углерода) методом, основанным на регистрации характеристического излучения, которое возникает при перезарядке ионов примесей на атомах инжектируемого пробного пучка. Методы корпускулярной диагностики найдут широкое применение на крупных установках следующего поколения для определения локальных параметров водородных ионов и ионов примесей.

КУЗНЕЦОВ Э. И.

Совещание по материалам для термоядерных реакторов

В работе совещания, состоявшегося 29—31 января 1979 г. в Майами (США), участвовали ученые из Великобритании, Дании, Канады, СССР, США, ФРГ, Швейцарии, Швеции, Японии. Было представлено 226 докладов, из них 18 обзорных, работали восемь секций: применение материалов в установках и системный анализ; взаимодействие плазмы со стенкой; радиационные эффекты; проблема трития и совместимости материалов; материалы для систем с инерционным удержанием плазмы; долговечность стенки; материалы для специальных целей; экономика и перспективные материалы.

Порядок работы конференции предусматривал представление оригинальных работ в основном в качестве стендовых докладов. Зачитывались только обзорные доклады, большая часть которых была представлена американскими учеными. На совещании выступил директор отдела термоядерных исследований Департамента энергетики США Э. Кинтнер, который сделал обзор состояния работ по термоядерной энергетике.

В некоторых докладах освещено состояние дел, перспективы, а также сделана попытка сформулировать основные требования к материалам в различных системах

с магнитным и инерционным удержанием плазмы, обсуждалась специфика материаловедческой проблемы в гибридных реакторах и т. д. В концептуальных проектах термоядерных реакторов намечается тенденция к некоторому увеличению нейтронной нагрузки на стенку до 2—4 МВт/м² по сравнению с 1 МВт/м², предусмотренных в проектах середины 70-х годов. Это вызвано как соображениями экономичности реакторов, так и надеждами на решение материаловедческих проблем. При этом прогнозируемая долговечность первой стенки соответствует нагрузке 10—20 МВт·год/м².

При обсуждении так называемых поверхностных эффектов, имеющих место при взаимодействии плазмы со стенкой, основное внимание уделялось таким явлениям, как химическое и физическое распыление, блистеринг, шелушение, захват и реэмиссия имплантируемого газа, вторичная ионная эмиссия и зарядовое состояние отраженных и распыленных частиц. В докладах американских специалистов были представлены работы по подбору лимиторов и экранов стенки с точки зрения устойчивости к тепловым ударам и термической усталости. Для испытания материалов в отношении устойчивости к тепловым ударам

и термической усталости потребуется разработать специальную программу испытаний, стандартизации, критерии сравнения и выбора материалов на основе имитационных испытаний. Значительный интерес представляют исследования распыления сложных соединений с преимущественным распылением одного (легкого) компонента сплава. Это в сочетании с радиационно-стимулированным диффузионным переносом легкого компонента из объема сплава к его поверхности, где устанавливается равновесная концентрация, открывает путь к уменьшению загрязнения термоядерной плазмы тяжелыми примесями. Работы американских и других исследователей дают основание полагать, что для уменьшения загрязнения плазмы за счет различных механизмов поверхностной эрозии следует продолжать работы в области разработки материалов с малым атомным номером: специальные марки графита, карбидов, боридов, их композитов с графитом, а также титановых покрытий. Распираются исследования механизма поступления примесей в плазму в результате возникновения униполярных дуг.

Получены новые результаты исследований явлений, связанных с захватом и реэмиссией изотопов водорода. Особенное внимание привлекает изучение титана и его сплавов, в которых наблюдается значительное поглощение и слабая реэмиссия изотопов водорода, а также материалов, где сильны изотопные эффекты. Как в отношении «поверхностных», так и «объемных» эффектов еще раз проявилась важность и необходимость комплексного подхода к решению материаловедческих задач УТС. Так, существенное влияние на уменьшение реэмиссии оказывает предварительное облучение образцов тяжелыми ионами, приводящее к большому числу смещений на атом. Рассмотренное взаимодействие конструкционных материалов с жидкими металлургическими теплоносителями по существу свелось к анализу литевой проблемы, также являющейся комплексной: материаловедческие аспекты технологии, связанной с тритием; отработка ловушек, геттерных систем, работоспособность систем прокачки и других элементов тритиевого контура; совместимость и коррозия материалов в жидком литии; ингибиторы коррозии в литии; использование различных солей лития и натрия в качестве теплоносителя; загрязнение жидкого лития примесями.

Доклады и дискуссия еще раз подтвердили, что проблема радиационной стойкости является особенно острой для материалов термоядерных реакторов. Особое внимание привлекают такие явления, как радиационное распухание и ползучесть, структурные и фазовые превращения под облучением, изменение механических свойств (особенно высоко- и низкотемпературное охрупчивание). В связи с этим необходимо дальнейшее расширение работ по определению природы радиационных эффектов при облучении материалов термоядерными нейтронами, оценки накопления гелия и водорода. Важное значение имеют теоретические работы по расчету образования и роста вакансионных пор, пузырьков газа и др., в том числе машинное моделирование.

Большое число работ посвящено исследованию распухания нержавеющей стали, в основном SS 316, облученной как в реакторах, так и на ионных ускорителях (имитационные испытания). Получены конкретные практические важные результаты. Например, предварительная 20%-ная холодная деформация уменьшает распухание этой стали при облучении в HIFIR в условиях накопления большого количества гелия и значительного числа смещений на атом (до 60) при температуре ниже 700 °С. Существен-

ное снижение распухания наблюдается и при легировании стали кремнием и титаном. Из данных имитационных испытаний других материалов привлекательны результаты, свидетельствующие о малом распухании титана и особенно его сплавов с алюминием и ванадием, полученные при большой дозе облучения. Однако данные нуждаются в подтверждении результатами реакторных испытаний.

В некоторых докладах отмечалось, что радиационные повреждения при сравнительно большой дозе облучения ускоряют фазовый распад и приводят к радиационно-стимулированному выпадению сегрегаций. Гелий оказывает сильное, но неоднозначное влияние на фазовый распад, ускоряя рост одних и замедляя рост других фаз. Интенсивно изучается радиационная ползучесть, которая, по мнению многих специалистов, может стать одним из основных факторов, определяющих конструкцию, работоспособность и экономичность будущих термоядерных реакторов. Для первой стенки реактора положение усугубляется тем, что вследствие перепада температуры по ее толщине возникают неравномерное распухание и ползучесть. Их взаимодействие приводит к возникновению дополнительного большого напряжения, значение которого увеличивается с ростом удельной нагрузки. Существенно при этом, что, как показали имитационные испытания, скорость радиационной ползучести при облучении в импульсном режиме больше, чем при стационарном облучении.

При изучении механических свойств возможных материалов термоядерных реакторов особое внимание уделялось влиянию большой концентрации радиационных дефектов, гелия и водорода на характеристики кратковременных испытаний, на циклическую усталость и механизмы деформирования. Значительно проявляется зависимость степени охрупчивания и упрочнения некоторых материалов и сплавов от спектра нейтронов. Вероятно, что здесь проявляется, с одной стороны, зависимость сечения реакции (n, α) от энергии, с другой — лидирующая роль гелиевого охрупчивания. В связи с этим работы по дозиметрии и экспериментальные данные по накоплению гелия в материалах с различным содержанием элементов, особенно с большим значением сечения реакции (n, α), представляют интерес.

Результаты исследований природы первичных радиационных дефектов, возникающих при облучении нейтронами высокой энергии, а также при имитационном облучении показали существенную зависимость структуры радиационных дефектов от спектра переданной энергии. В некоторых случаях наблюдается несопоставимость экспериментальных результатов, полученных различными авторами. Нет соответствия качественных и количественных характеристик каскадов и субкаскадов, функций повреждения и т. п. при сопоставлении экспериментальных результатов с расчетами на машинах.

В целом работа совещания была весьма плодотворной. Она показала важность и необходимость решения проблемы материаловедения для термоядерного синтеза, расширение работ в этом направлении и в то же время поставила новые проблемы и задачи, решение которых будет способствовать созданию надежных, экономичных и долговременно работающих установок и термоядерных реакторов.

Труды совещания будут опубликованы в «Journal of Nuclear Materials».

МАХЛИН Н. А.