УДК 533.924,621.039.623,621.039.634

ОБЗОР ДОКЛАДОВ НА 12-м МЕЖДУНАРОДНОМ СИМПОЗИУМЕ ПО ОБРАЩЁННЫМ К ПЛАЗМЕ МАТЕРИАЛАМ И КОМПОНЕНТАМ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ (PFMC-12)

А.В. Голубева (РНИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия)

В мае 2009 г. в Исследовательском центре г. Юлиха, Германия, прошел симпозиум, посвященный разработке, характеристике и применению в термоядерных установках различных обращенных к плазме материалов (ОПМ) и компонентов (ОПК). Представленные на симпозиуме доклады наглядно отражают основные проблемы и направления приложения усилий в области разработки ОПМ и ОПК для термоядерных реакторов.

Ключевые слова: материалы, обращенные к плазме, конструкционные материалы.

REVIEW OF REPORTS PRESENTED AT THE 12-th INTERNATIONAL WORKSHOP ON PLASMA FACING MATERIALS AND COMPONENTS FOR FUSION APPLICATIONS (PFMC-12). A.V. GOLUBEVA. The PFMC-12 workshop was held in May 2009 in the Juelich Research Center. It was devoted to plasma facing materials (PFMs) and components (PFCs) development, testing and application in thermonuclear installations. The talks presented show main problems and directions of investigation and engineering in the field of PFMs and PFCs development for fusion applications.

Key words: plasma facing materials, structural materials.

ВВЕДЕНИЕ

Симпозиум предваряли четыре обзорные лекции, посвященные взаимодействию плазмы с поверхностью (К. Кригер, Гархинг, Германия) [1], инженерной разработке обращенных к плазме компонентов (М. Мерола, Кадараш, Франция) [2], повреждению ОПМ при облучении плазмой и нейтронами (М. Рубель, Стокгольм, Швеция) [3] и тестированию обращенных к плазме компонентов (И. Линке, Юлих, Германия) [4]. Лекции были весьма интересны не только аспирантам, на которых они были рассчитаны, но и всем слушателям, в особенности тем, кто недавно занялся исследованиями в области взаимодействия плазмы с материалами. Лекции позволили увидеть проблему и со стороны физиков, и со стороны инженеров-технологов. Можно смело рекомендовать предварять любой симпозиум сжатыми обзорными лекциями, посвященными современному состоянию знаний в области и основным решаемым проблемам.

Помимо обзорных лекций, на симпозиуме были представлены 27 устных докладов, 11 из которых сделаны немецкими учеными, а остальные — японскими, английскими и французскими коллегами. Число представленных на симпозиуме стендовых докладов превысило 130. 42 докладчика — представители Германии, около 10 — представители России, по 10 докладов было сделано учеными из Японии, Франции и Нидерландов. Большая часть остальных докладов была сделана учеными из европейских стран. Соотношение докладов отражает доминирование Германии, в частности, и Евросоюза в целом в разработке обращенных к плазме материалов и компонентов.

Секция стендовых докладов была слишком большой для отведенного на неё времени. Поэтому возможно, что в дальнейшем продолжительность симпозиума увеличится, а сам симпозиум приобретёт статус конференции.

СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО РАЗРАБОТКЕ ОБРАЩЕННЫХ К ПЛАЗМЕ МАТЕРИАЛОВ И КОМПОНЕНТОВ

В настоящее время проект Международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР не является окончательным. В частности, хотя ОПМ установки ИТЭР — бериллий, углерод и вольфрам — давно известны, конструкция и способ создания обращенных к плазме компонентов до сих пор не выбраны.

В докладе Р.А. Питтса (ИТЭР, Франция) [5] было рассказано о последних изменениях в проекте дивертора реактора ИТЭР. Граница раздела углеродно-волоконистый композит (CFC)—вольфрам спустилась на 10 см ниже. Таким образом, площадь углеродного покрытия в реакторе сокращается. Купол (дом) дивертора стал меньше. Одна из целей этого — упрощение доступа для диагностических целей. Согласно моделированию эти изменения несущественно влияют на эксплуатационные качества установки. Положительным результатом изменений является более симметричная нагрузка на внутреннюю и

внешнюю диверторные пластины. Диверторные пластины будут располагаться под небольшим ($2\text{--}3^\circ$) углом к облицовываемой поверхности таким образом, чтобы прикрыть щели между пластинами от потока частиц, движущихся вдоль линий магнитного поля. Позиционирование кассет с необходимой точностью остаётся серьёзной инженерной проблемой.

В обзорном докладе М. Мерола (Кадараш, Франция) [2] говорилось об основных проблемах создания обращенных к плазме компонентов реактора ИТЭР. Для облицовки первой стенки будет использовано покрытие Be—CuCrZn . Поскольку коэффициенты теплового расширения покрытия и подложки близки, в данном случае не нужен амортизирующий промежуточный слой. Проблема соединения Be и CuCrZn заключается в том, что при температуре $>600^\circ\text{C}$ образуются хрупкие интерметаллиды BeCu , Be_2Cu . Поэтому или должна быть выбрана технология настолько быстрой сварки, чтобы интерметаллиды не успевали образоваться, или между подложкой и бериллиевым покрытием нужно поместить слой вещества, выполняющего функции диффузионного барьера.

Дивертор на начальной стадии будет облицован CFC—Cu—CuCrZn , затем — W—Cu—CuCrZn . Промежуточный слой меди необходим в обоих случаях, так как коэффициенты теплового расширения покрытия и подложки значительно отличаются. Поскольку CFC не смачивается медью, при изготовлении облицовочного элемента эти материалы должен соединять промежуточный слой, например, титана.

Свойства CuCrZn существенно зависят от правильного распределения компонентов в матрице. Поэтому при сварке покрытий с подложкой могут ухудшиться прочность и теплопроводность подложки, что является отдельной проблемой создания обращенных к плазме компонентов реактора ИТЭР.

В докладах симпозиума неоднократно (начиная с обзорного доклада М. Рубеля [3]) звучал список основных требований к обращенным к плазме материалам реактора. Подчеркивая важность высокой теплопроводности компонентов, ей символически отводят первые три позиции списка. Также очень важно, чтобы свойства материалов были стабильными под воздействием плазмы. С этой точки зрения очень опасно нейтронное облучение, ведь повреждения кристаллической решётки приведут к изменению теплопроводности материала. Трансмутация примесей может привести к совершенно непредсказуемым изменениям свойств материала. Поэтому необходимо использовать очень чистые материалы. Один из основных выводов доклада заключается в том, что реактор ИТЭР будет построен с использованием материалов, не отестированных относительно нейтронного облучения.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАЩЁННЫХ К ПЛАЗМЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗКАХ

Обращенные к плазме материалы и элементы конструкции исследуются при тепловых нагрузках, близких к ожидаемым в термоядерном реакторе. Обычно тепловую нагрузку создают мощным пучком электронов (в частности, на установках Judith I, II Исследовательского центра Юлиха). Типичные нагрузки, имитирующие:

- нормальную работу — $0,2\text{--}5\text{ МВт/м}^2$;
- ELM — $\sim 1\text{ МДж/м}^2$, длительность $0,1\text{--}0,5\text{ с}$;
- срыв плазмы — $10\text{--}100\text{ МДж/м}^2$, длительность $0,1\text{--}10\text{ с}$.

Высокая мощность теплового потока достигается за счёт фокусирования пучка электронов на очень небольшой площади. Область воздействия увеличивают, сканируя поверхность этим узким пучком. При этом исследуют структурные изменения в обращенных к плазме материалах и повреждения обращенных к плазме компонентов.

Структурные изменения в вольфраме при тепловых нагрузках подробно обсуждались в докладе И. Ютденхауена (SCK·CEN, Бельгия) [6]. В зависимости от плотности энерговыделения в материале происходят структурные изменения. Если превышен «порог растрескивания», наблюдаются растрескивание и рекристаллизация материала. Если превышен «порог плавления» ($0,3\text{ МДж/м}^2$), плавится поверхностный слой материала в зоне облучения. При тепловой нагрузке $>1\text{ МДж/м}^2$ поверхностный слой кипит и происходит разбрызгивание капель расплавленного вольфрама. Если вольфрам был предварительно рекристаллизован, его повреждения гораздо значительнее. Таким образом, крайне желательно, чтобы температура вольфрамовых ОПМ в термоядерных реакторах оставалась ниже температуры рекристаллизации вольфрама.

Согласно докладу И.Е. Гаркуши (Институт физики плазмы, г. Харьков, Украина) [7] в результате воздействия мощного потока тепловой энергии в вольфраме образуются трещины трёх типов:

- главные трещины. Растрескивание происходит по граням кристаллитов, если в момент воздействия мощным потоком энергии температура вольфрама была меньше температуры перехода из пластичного в хрупкое состояние (ductile-to-brittle transition temperature — DBTT). Согласно докладу DBTT вольфрамовых материалов обычно находится в интервале 100—400 °C. С ростом числа импульсов главные трещины растут и достигают ширины ~10 мкм;

- микротрещины — трещины, возникающие внутри зёрен кристаллитов вольфрама как следствие сильного температурного градиента и значительных напряжений в поверхностном слое. Эти напряжения высвобождаются путём растрескивания. Микротрещины образуются, даже если температура образца до нагрузки была >DBTT. Число микротрещин растёт с числом импульсов воздействия мощным тепловым потоком. Ширина этих трещин может превышать 10 мкм;

- усталостные трещины — трещины, образующиеся после застывания расплавленного металла. Эти трещины возникают после нескольких сотен циклов нагрузки. Их ширина может достигать нескольких микрон.

Главные трещины наиболее опасны для покрытия, что накладывает второе требование на рабочую температуру вольфрамовых ОПМ: она должна быть выше DBTT.

Ряд докладов был посвящён контролю обращённых к плазме компонентов. Неизбежно некоторые из обращённых к плазме элементов реактора ИТЭР будут с дефектами, потому что во внутренней облицовке реактора ИТЭР более 10^5 соединений CFC—Cu, W—Cu, Cu—CuCrZn. Важно до сборки выбраковать те компоненты, теплопроводность которых при больших тепловых нагрузках будет недопустимо низкой. Неразрушающим методом анализа обращённых к плазме компонентов (ОПК) был посвящён доклад С. Сузуки (S. Suzuki, Японское агентство по атомной энергии) [8]. Для металлических ОПК таким методом является ультразвуковое исследование. Однако этот метод неприменим для элементов облицовки, изготовленных из CFC, из-за существенной неоднородности покрытия. В этом случае используют термографию. Через трубки охлаждения облицованных CFC блоков пропускают воду вначале при температуре 5 °C, затем, после некоторого перерыва, при температуре 95 °C. Инфракрасные камеры регистрируют изменение температуры лицевой и боковой поверхностей блока при его остывании и нагревании. Анализ динамики термограмм позволяет сделать заключение о дефектах.

Относительно допустимых размеров дефектов в докладе Ф. Эскурбиака (F. Escourbiac, Исследовательский центр Юлиха, Германия) [9] были приведены следующие данные: допустимый угловой размер (протяжённости по периметру трубки охлаждения) дефектов сварных соединений в элементах внутренней облицовки составляет <45° для вольфрамовых блоков и <50° для CFC.

ВОЛЬФРАМОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Вольфрам — один из наиболее многообещающих материалов ТЯР вследствие высокой температуры плавления, отсутствия химического распыления водородом и низкого в сравнении с графитом вклада в накопление изотопов водорода.

Доклад Р. Ноя (ASDEX-U, г. Гархинг) [10] был посвящён десятилетнему опыту использования вольфрама в качестве ОПМ установки ASDEX-U. В течение этих лет был осуществлён постепенный переход от углеродной к полностью вольфрамовой установке. После перехода к вольфраму значительно уменьшилось накопление дейтерия в ОПМ. При этом токамак успешно функционирует и без боронизации.

Наиболее удачным из использованных был плазменно-напылённый в вакууме вольфрам (VPS—W) толщиной 200 мкм на графитовой подложке. При нагрузках 10 МВт/м² наблюдалось отслоение покрытия на некоторых облицовочных плитках, однако работать при таких повреждениях все же можно. Автор доклада заключает, что при разрядах высокой мощности необходимо дополнительное охлаждение поверхности ОПМ. В целом опыт использования вольфрама в токамаке ASDEX-U признан положительным. Поэтому в диверторе реактора ИТЭР CFC будет использоваться в качестве ОПМ лишь на первой стадии работы, в дальнейшем покрытие будет заменено на вольфрамовое. При практически идентичном

химическом составе свойства вольфрамовых материалов и покрытий могут заметно отличаться, поскольку существенно зависят от структуры материала.

Доклад Х. Майера (Институт физики плазмы, г. Гархинг) [11] был посвящён выбору вольфрамового материала для облицовки установки JET в рамках проекта ITER-like wall. До недавнего времени по результатам испытаний при больших тепловых нагрузках самым устойчивым вольфрамовым покрытием считался плазменно-напылённый в вакууме вольфрам на подложке из CFC (VPS—W—CFC). Однако выяснилось, что устойчивость покрытия существенно зависит от размеров образца: чем меньше образец, тем лучше покрытие сохраняется при длительной нагрузке. При размерах подложки, сопоставимых с теми, что будут использоваться в установке JET, стабильность VPS—W—CFC при тепловых нагрузках неудовлетворительна.

В качестве запасного варианта предполагалось использовать вольфрамовое покрытие, осаждённое методом PVD (Physical Vapour Deposition — физическое осаждение из паровой среды), с промежуточным слоем рения. Однако и этот вариант оказался неприемлем, поскольку наблюдались диффузия и окисление рения, механизм диффузии не ясен, а времени на решение этой проблемы у команды установки JET нет.

В стендовом докладе С. Русета (С. Ruset, NILPRP, Национальный институт лазеров, плазмы и радиационной физики, Бухарест) [12] был представлен новый вольфрамовый материал, созданный путём сочетания магнетронного распыления с внедрением ионов высокой энергии (Combined Magnetron Sputtering & High Energy Ion Implantation, CMSII). В настоящее время это покрытие является наиболее стабильным к тепловым нагрузкам, и именно оно будет использовано на установке JET. Однако после образования карбида наблюдается незначительное расслаивание CMSII-покрытия, так что необходимы дальнейшие исследования стабильности его свойств.

МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДА

В реакторе ИТЭР в качестве ОПМ дивертора будут использоваться углеродные композитные материалы (CFC), представляющие собой объёмную структуру из углеродных волокон и углеродного наполнителя. Интересной представляется информация Э. Цитрона (Е. Tsitrone, Франция) [13] о том, что в CFC нет преимущественного распыления волокон или наполнителя.

В докладе А. Кретера (А. Kreter, Исследовательский центр Юлиха) [14] были представлены интересные данные о накоплении водорода в углеродных материалах. На рис. 1 представлено сравнение ре-

Рис. 1. Данные о накоплении водорода в углеродных материалах, полученные при облучении ионными пучками и плазмой (А. Кретер. «Fuel retention in carbon materials under ITER-relevant mixed species plasma conditions», доклад на PFMC-12, май 2009 г.)

зультатов, полученных в экспериментах с ионными пучками и на плазменных установках. При плазменном облучении углеродные материалы захватывают на порядок меньше, чем при ионном облучении. Это связано с существенно разными плотностями потоков частиц при ионном и плазменном облучении. Таким образом, моделирование взаимодействия плазмы с углеродом путём ионного облучения в лабораторных условиях не даёт количественно значимых для ТЯР результатов.

Один из основных выводов доклада заключается в том, что И. Рот в своих известных данных (рис. 2) значительно переоценивает захват изотопов водорода в углеродных материалах, поскольку не учитывает влияние плотности потока на накопление.

Также интересны представленные в докладе А. Крестера [14] данные о влиянии облучения ионами бериллия, которые будут присутствовать в плазме реактора, на накопление дейтерия в углеродных материалах. В результате внедрения бериллия образуется слой карбида бериллия Be_2C толщиной несколько сотен нанометров. Этот слой подавляет проникновение водорода вглубь образца. Таким образом, наличие в пристеночной плазме ионов бериллия приведёт к уменьшению накопления изотопов водорода в углеродных ОПМ.

В докладе Г. де Теммермана (Culham Science Center, Великобритания) [15] обсуждалась возможность использования алмаза в качестве ОПМ. Достоинством алмаза является его высокая теплопроводность — в 2,5—5 раз выше, чем у меди. Его скорость травления водородом на два порядка меньше, чем у графита. Алмаз устойчив к повреждениям при облучении нейтронами. Существенным недостатком алмаза является его графитизация при 1200—1500 °С. Кроме того, этот материал очень трудно механически обрабатывать.

Докладчик рассказал о технологии химического осаждения из паровой среды, позволяющей осаждать на подложки кристаллиты алмаза. В зависимости от условий осаждения размер кристаллитов может варьироваться от нано- до микрометрового. Отработанная технология позволяет осаждать покрытия толщиной 3 мм на подложку диаметром 10 см, т.е. размеров, сравнимых с необходимыми для ОПМ токамаков. Полученные покрытия экспонировались в токамаке MAST. Интересным результатом является тот факт, что легирование алмаза 0,1% бора приводит к двукратному снижению коэффициента распыления ионами водорода с энергией 20 эВ.

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РЕАКТОРА ДЕМО

Таблица 1. Кандидатные материалы реактора ДЕМО по версии европейских учёных

Первая стенка		Дивертор	
ОПМ	конструкционный материал	ОПМ	конструкционный материал
Сплав на основе W, W-покрытие на поверхности	RAFM, OSD, сплав на основе V, композит SiC—SiC	Сплав на основе W, W-композит SiC—SiC, Li, Ga, Sn, SnLi	RAFM, OSD, сплав на основе W

качестве ОПМ ДЕМО рассматривают вольфрамовые материалы и жидкие металлы, в первую очередь литий.

Конструкционные материалы должны состоять из элементов с низкой активацией при нейтронном облучении (Fe, Cr, V, Ti, W, Si, C). Это и определяет выбор конструкционных материалов: сплавы на основе вольфрама или ванадия, композиты из карбида кремния, ферритно-мартенситные стали пониженной активации (RAFM), дисперсно-упрочнённые кислородом (ODS) ферритно-мартенситные и ферритные стали.

Рис. 2. Оценка накопления трития в реакторе ИТЭР (И. Рот, Институт физики плазмы, г. Гархинг, Германия)

Доклад Н. Балука (Центр исследований в области физики плазмы, Швейцария) [16] был посвящён деградации материалов в условиях реактора ДЕМО.

В табл. 1 приведены кандидатные материалы реактора ДЕМО, рассматриваемые европейскими учеными. Основные требования к ОПМ — стабильность под действием мощных тепловых потоков и минимизация накопления трития. Поэтому в

В табл. 2 представлены интервалы температур, в которых возможно использование материалов первой стенки реактора DEMO. Температурные окна определяют DBTT, охрупчивание под действием облучения и при возникновении гелия в объёме материала, деградацию теплопроводности, радиационное распухание, ползучесть, химическую совместимость.

Т а б л и ц а 2. Приемлемые температуры материалов первой стенки

Материал	RAFM	OSD, RAFM	Сплавы V	SiC—SiC	W
Температурное окно, К	300—660	560—730	420—660	500—1000	940—1200

В докладе рассмотрено влияние различных факторов на свойства сталей как материалов конструктивных элементов реактора. Одним из основных выводов является то, что ферритно-мартенситные стали пониженной активации (RAFM) активируются значительно меньше и в лучшей степени сохраняют свои свойства под действием нейтронного облучения, чем аустенитные стали. Однако влияние гелия и радиационного упрочнения при больших дозах облучения (15—72 сна) предстоит изучать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Симпозиум наглядно отразил основные проблемы и направления приложения усилий в области разработки обращённых к плазме материалов и компонентов ТЯР.

За последние годы резко изменилось основное направление исследований в области взаимодействия плазмы с материалами. Ещё 2—3 года назад большая часть исследований была посвящена графиту. Теперь же в связи с положительным опытом использования вольфрама в установке ASDEX-U и вероятным отказом от использования графита на втором этапе работы реактора ИТЭР исследования графитовых материалов практически прекратились. Большая часть учёных, ранее занимавшихся графитом, перенесла своё внимание на вольфрамовые материалы. При этом бериллий, площадь покрытия которым в реакторе ИТЭР будет наибольшей, исследуют очень мало. Увеличилось число работ, в которых проводилось компьютерное моделирование взаимодействия плазмы с бериллием, однако экспериментальным исследованиям было посвящено лишь несколько докладов.

REFERENCES

1. **Krieger K.** Plasma-material interactions and their implications for fusion reactor wall components. Report T-1, PFMC-12, May 2009, Jülich, Germany.
2. **Merola M.** Engineering of Plasma-Facing-Components. Report T-2, PFMC-12, May 2009, Jülich, Germany.
3. **Rubel M.** Plasma-facing materials (issues related to radioactivity and radiation induced effects). Report T-3, PFMC-12, May 2009, Jülich, Germany.
4. **Linke J.** Characterization and testing of plasma facing materials under operating conditions. Report T-4, PFMC-12, May 2009, Jülich, Germany.
5. **Pitts R.A., Kukushkin A.S., Loarte A. et al.** Physics basis and status of ITER. Report I-1, PFMC-12, May 2009, Jülich, Germany.
6. **Uytendhouwen I., Pintsuk G., Linke J. et al.** Thermal mechanical characterization of W and W alloys. Report C-4, PFMC-12, May 2009, Jülich, Germany.
7. **Garkusha I.E., Arkhipov N.I., Klimov N.S. et al.** Latest results from ELM-simulation experiments in plasma accelerators. Report I-4, PFMC-12, May 2009, Jülich, Germany.
8. **Suzuki S., Ezato K., Seki Y. et al.** Recent activity on the development of the plasma facing components for ITER and fusion DEMO plant. Report I-3, PFMC-12, May 2009, Jülich, Germany.
9. **Escourbiac F., Richou M., Guigon R. et al.** Acceptance criteria for the ITER high heat flux components. Report I-2, PFMC-12, May 2009, Jülich, Germany.
10. **Neu R., Bobkov V., Dux R. et al.** Ten years of W programme in ASDEX upgrade — challenges and conclusions. Report C-2, PFMC-12, May 2009, Jülich, Germany.
11. **Maier H., Neu R., Greuner H.** Qualification of tungsten coatings on plasma-facing components for JET. Report I-6, PFMC-12, May 2009, Jülich, Germany.
12. **Ruset C., Grigore E., Maier H. et al.** The influence of the Mo interlayer on the properties of W coatings deposited on CFC and FGG substrates by combined magnetron sputtering and ion implantation technique. Report P-15, PFMC-12, May 2009, Jülich, Germany.
13. **Tsitron E., Brosset C., Bucalossi J. et al.** Recent fuel retention studies in Tore Supra, ASDEX upgrade and TEXTOR. Report I-7, PFMC-12, May 2009, Jülich, Germany.
14. **Kreter A., Baldwin M.J., Doerner R.P. et al.** Fuel retention in carbon materials under ITER-relevant mixed species plasma conditions. Report C-6, PFMC-12, May 2009, Jülich, Germany.

15. **De Temmerman G., Lisgo S., Baldwin M.J. et al.** Diamond as a plasma-facing material for fusion? Report C-7, PFMC-12, May 2009, Jülich, Germany.
16. **Baluc N.** Material degradation under DEMO relevant neutron fluences. Report C-7, PFMC-12, May 2009, Jülich, Germany.

AUTHORS

Golubeva A.V. RRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia;
Golubeva_AV@nrcki.ru

Received 29 September 2009
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2009, issue 4, pp. 54—60.