УДК 620.19:661.877

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ МОЛИБДЕНОВЫХ ЗЕРКАЛ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В ИТЭР

Ю.В. Капустин^{1,2}, А.В. Рогов^{1,2}

¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²УТС-Центр, Москва, Россия

Загрязнение внутривакуумных компонентов реактора ИТЭР в ходе аварий, связанных с попаданием в рабочую камеру воды из системы водяного охлаждения установки, представляет опасность для последующей работы как всей установки, так и отдельных диагностических систем. В настоящей статье рассмотрен процесс деградации оптических свойств монокристаллических молибденовых зеркал, используемых в ряде оптических диагностик, при их взаимодействии с водой и паром. Экспериментально исследована динамика изменения коэффициентов зеркального отражения и диффузного рассеяния зеркал в зависимости от времени и режима воздействия. Показано, что наихудший сценарий, представленный в документах ИТЭР под названием steam event, хорошо моделируется воздействием дистиллированной воды при температуре ≈ 97 °C. Полученные в ходе данных экспериментов образцы молибденовых зеркал с имитационным загрязнением были использованы для тестирования работы плазменной системы очистки зеркал на основе аномального тлеющего разряда в сеточном полом катоде с использованием постоянного или импульсного тока. Показано, что очистка молибденовых зеркал от загрязнений, полученных в ходе моделирования аварийных ситуаций с попаданием воды в рабочую камеру реактора, с использованием аргона в качестве плазмообразующего газа способна восстановить оптическое качество зеркала практически до исходного уровня.

Ключевые слова: молибден, вода, пар, зеркало, загрязнение, очистка.

THE INVESTIGATION OF MOLYBDENUM MIRROR DEGRADATION AT MODELING OF A LEAKAGE IN THE WATER COOLING SYSTEM OF ITER

Yu.V. Kapustin, A.V. Rogov

¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²Fusion Centre, Moscow, Russia

A pollution of ITER in-vessel components in the course of accidents associated with the ingress of water from the water cooling system into the vacuum vessel poses a danger to the subsequent operation of both the entire plant and individual diagnostic systems. The process of degradation of the optical properties of single-crystal Mo mirrors at their interaction with liquid water and water vapor was considered in this paper. Such mirrors will be used in a number of optical diagnostics. The dynamics of changes in the specular reflection and diffuse scattering coefficient as a function of exposure time and interaction mode have been experimentally investigated. It is shown that the worst-case scenario presented in ITER's documents under the name steam event is well modeled by mirror exposure to distilled water at ≈ 97 °C. Samples of Mo mirrors with imitating contamination obtained during these experiments were used to test the operation of the mirror cleaning system based on a direct pulsed current abnormal glow discharge in a grid hollow cathode. It is shown that Mo mirror could be cleaned from pollutions obtained at modeling of water events when Ar is used as the plasma-forming gas.

Key words: molybdenum, water, steam, mirror, pollution, cleaning.

DOI: 10.21517/0202-3822-2019-42-1-57-65

ВВЕДЕНИЕ

Для измерения параметров термоядерной плазмы в реакторе ИТЭР будут использованы оптические диагностики, содержащие в своём составе систему зеркал, предназначенных для передачи излучения от плазмы к измерительной аппаратуре, расположенной вне вакуумной камеры реактора. Наиболее ответственным компонентом среди них является так называемое «первое зеркало», принимающее излучение непосредственно из термоядерной плазмы [1]. В ходе рабочих импульсов плазмы на данное зеркало будут воздействовать такие негативные факторы, как бомбардировка поверхности атомами перезарядки, высокая температура, нейтронные потоки, переосаждение продуктов эрозии конструкционных материалов реактора и др. По результатам многолетних исследований [2] на роль материала первого зеркала для ряда диагностик был выбран монокристаллический молибден [3, 4], поведение которого в ходе аварийных ситуаций и будет рассмотрено в представленной статье.

К недостаткам молибдена (Mo) как материала для изготовления первого зеркала стоит отнести его химическую активность при повышенных температурах. При окислении молибдена в интервале температуры 300—700 °C на его поверхности образуется стабильный оксид MoO_2 (диэлектрик [5]), при низкотемпературном окислении [6], в частности, при длительном хранении зеркал (несколько лет) в нормальных условиях за счёт взаимодействия с парами воды и кислородом атмосферного воздуха на зеркалах образуется тонкая плёнка полупроводника MoO_3 [5]. Возникновение такой плёнки приводит к ухудшению оптического качества зеркала, что позволяет рассматривать её в качестве загрязнения. Существуют опасения, что подобное загрязнение может сформироваться и на Mo-зеркала в ИТЭР: от момента изготовления до установки зеркал в рабочую камеру токамака пройдёт около 2 лет, в течение которых зеркала будут подвержены воздействию атмосферного воздуха, а в ходе работы реактора существует вероятность возникновения аварийных ситуаций [7, 8], приводящих к воздействию на нагретое зеркало водяного пара и воздуха. В настоящее время худшим с точки зрения воздействия на зеркала аварийным сценарием считается steam event — прорыв воды в рабочую камеру реактора во время рабочего импульса, когда суммарная площадь отверстий в трубках системы водяного охлаждения 200 см² [9]. После этого в течение ~10 ч внутрикамерные компоненты будут находиться в условиях 100%-ной влажности при температуре 100—250 °C. На рис. 1 представлен расчётный график изменения температуры пара внутри вакуумной камеры ИТЭР [8] после возникновения steam event.

Рис. 1. Зависимость температуры пара внутри вакуумной камеры ИТЭР от времени, прошедшего после прорыва трубок системы водяного охлаждения (steam event) [8]

Именно сценарий steam event был выбран Международной организацией ИТЭР для тестирования стойкости зеркал к коррозии. Первые систематизированные результаты тестов зеркал, изготовленных из различных материалов, были представлены в [10], где было показано, что событие steam event приводит к существенной деградации Mo-зеркал, делая невозможным их дальнейшую эксплуатацию без проведения очистки.

План-график работы ИТЭР предусматривает возможность замены вышедших из строя внутрикамерных элементов оптических диагностик не чаще, чем один раз в 4 года [11], поэтому в состав всех диагностик включена встроенная система для периодической очистки поверхности первого зеркала от загрязнений, возникших в ходе эксплуатации реактора. Для диагностик «активная спектроскопия» и «спектроскопия водородных линий», разрабатываемых в рамках обязательств Российской Федерации по программе ИТЭР, для очистки зеркал будет использоваться ионное распыление в сеточном поле катода в разряде на постоянном или среднечастотном импульсном токе [12, 13].

Для оценки ресурса зеркал при возникновении аварийных ситуаций важно оценить скорость деградации их спектрального коэффициента отражения, а также определить эффективность разрабатываемой плазменной системы очистки. Представленная работа преследует три основные цели: определить скорость деградации зеркала в ходе возможных аварийных ситуаций с разгерметизацией системы водяного охлаждения внутривакуумных компонентов ИТЭР; разработать методику формирования имитационных загрязнений на тестовых образцах зеркал для последующего их использования при разработке встроенной в узел входного зеркала плазменной системы очистки зеркала для оптических диагностик «спектроскопия водородных линий» [14] и «активная спектроскопия» [15] в разряде на постоянном или импульсном токе; оценить эффективность выбранного метода очистки при удалении имитационных загрязнений.

Для достижения поставленных целей было проведено экспериментальное моделирование нескольких аварийных сценариев с использованием опытных образцов монокристаллических Mo-зеркал уменьшенного размера, изготовленных по технологии, выбранной для производства полноразмерных Mo-зеркал (ФГУП «НИИ НПО «Луч», г. Подольск). Размер использованных образцов Ø26 мм × 3 мм, кристаллографическая ориентация {110}.

Для достижения поставленных целей было проведено экспериментальное моделирование нескольких аварийных сценариев с использованием опытных образцов монокристаллических Mo-зеркал уменьшенного размера, изготовленных по технологии, выбранной для производства полноразмерных Mo-зеркал (ФГУП «НИИ НПО «Луч», г. Подольск). Размер использованных образцов Ø26 мм × 3 мм, кристаллографическая ориентация {110}.

За время эксплуатации ИТЭР ожидается не более 15 событий steam event [7], однако возможны и другие сценарии аварийных ситуаций. Опыт использования термоядерных установок JET, TEXTOR и др. показал [16], что в первые годы эксплуатации установки основным источником продолжительного поступления воды в рабочую камеру реактора станут микротечи в системе водяного охлаждения: сварных швах, местах соединения труб и т.п. Условия таких событий в ИТЭР не регламентированы, и динамика изменения оптических свойств внутривакуумных оптических компонентов в таких условиях остаётся невыясненной. По этой причине в настоящей работе для дальнейшего исследования выбраны несколько аварийных сценариев, представляющихся авторам наиболее вероятными. Они представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Моделируемые аварийные сценарии

Описание сценария аварии	Охлаждение зеркала	Ожидаемые условия в ИТЭР	Эксперимент
Возникновение микротечи в трубе системы охлаждения, воздействие пара низкого давления	Без водяного охлаждения	Температура стенок $T_W = 70\text{—}250\text{ }^\circ\text{C}$, температура зеркала $T_M = 100\text{—}250\text{ }^\circ\text{C}$, давление пара $P_V \approx 1\text{—}50\text{ кПа}$	Температура стенок $T_W = 25\text{ }^\circ\text{C}$, температура зеркала $T_M = 250\text{ }^\circ\text{C}$, давление пара $P_V \approx 3\text{ кПа}$
Разрыв трубки системы охлаждения, воздействие пара при $\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$	С водяным охлаждением	Температура стенок $T_W > 100\text{ }^\circ\text{C}$, температура зеркала $T_M \approx 100\text{ }^\circ\text{C}$, давление пара $P_V \leq 150\text{ кПа}$	Температура стенок $T_W \approx 110\text{ }^\circ\text{C}$, температура зеркала $T_M \approx 110\text{ }^\circ\text{C}$, давление пара $P_V \approx 150\text{ кПа}$
Разрыв нескольких трубок системы охлаждения вблизи зеркала, воздействие пара высокого давления (steam event [9])	Без водяного охлаждения	Температура стенок $T_W = 100\text{—}250\text{ }^\circ\text{C}$, температура зеркала $T_M = 100\text{—}350\text{ }^\circ\text{C}$, давление пара $P_V \approx 100\text{—}150\text{ кПа}$	Температура стенок $T_W = 250\text{ }^\circ\text{C}$, температура зеркала $T_M = 250\text{ }^\circ\text{C}$, давление пара $P_V \approx 150\text{ кПа}$
Разрыв нескольких трубок системы охлаждения вблизи от зеркала, воздействие воды	Без водяного охлаждения	Температура стенок $T_W \geq 100\text{ }^\circ\text{C}$, температура зеркала $T_M = 100\text{—}350\text{ }^\circ\text{C}$, воздействие воды при температуре зеркала	Температура стенок $T_W = 97\text{ }^\circ\text{C}$, температура зеркала и воды $T_M = 97\text{ }^\circ\text{C}$, воздействие воды
	С водяным охлаждением	Температура стенок $T_W > 100\text{ }^\circ\text{C}$, температура зеркала $T_M \leq 100\text{ }^\circ\text{C}$, конденсация воды на отражающей поверхности зеркала	

Часть образцов, подвергнутых испытанию в представленных в табл. 1 режимах, была в дальнейшем использована для проверки возможности удаления с отражающей поверхности зеркал имитационных загрязнений при использовании плазменной системы очистки на основе разряда постоянного/импульсного тока [12].

ОБОРУДОВАНИЕ

Для экспериментального моделирования указанных в табл. 1 сценариев воздействия воды были спроектированы и изготовлены четыре стенда.

Стенд для моделирования деградации Мо-зеркал в случае появления микротечи воды (сценарий № 1). В силу наличия в ИТЭР большого числа ($\sim 10^4$) сварных соединений элементов системы охлаждения различных компонентов установки сценарий с возникновением течи в сварочном шве и поступлением в рабочую камеру реактора небольшого количества воды является наиболее вероятным. Для моделирования данного аварийного сценария был изготовлен стенд, схема и фотография которого представлены на рис. 2.

Стенд содержит вакуумную камеру 1 малого размера, откачную систему, состоящую из безмасляных турбомолекулярного 3 и спирального 4 насосов, систему контроля давления, ввод для напуска в камеру воды, держатель зеркала со встроенным нагревателем 8. В ходе экспериментов

Рис. 2. Схема (а) и фотография (б) стенда для исследования воздействия пара низкого давления на нагретое до $250\text{ }^\circ\text{C}$ Мо-зеркало: 1 — вакуумная камера; 2 — вакуумный клапан; 3 — турбомолекулярный насос; 4 — форвакуумный насос; 5, 6 — вакуумметры; 7 — клапан напуска воздуха; 8 — держатель зеркала со встроенным нагревателем; 9 — Мо-зеркало; 10 — термопарный измеритель температуры; 11 — пережимаемая трубка; 12 — вода; 13 — дозатор воды

образцы зеркал 9 помещались на держатель, вакуумная камера откачивалась до давления $\approx 0,01$ Па. После этого включался нагреватель зеркала, и температура зеркала поднималась до ≈ 250 °С (измерялась с использованием встроенной в держатель термопары). По окончании нагрева зеркала производилось закрытие высоковакуумного клапана 2, и через клапан 11, состоящий из короткой резиновой трубки и медицинского зажима, в камеру подавалась вода. При этом из дозатора 13, в качестве которого использовался медицинский шприц, под воздействием атмосферного давления на свободный поршень в рабочую камеру производился впрыск заданной порции воды 12. Объем воды рассчитывался из условия достижения давления насыщенных паров воды ($P \approx 3$ кПа). Режим источника питания нагревателя корректировался, чтобы поддерживать стационарную температуру зеркала (≈ 250 °С). После окончания эксперимента отключалась система нагрева зеркала и проводилась откачка вакуумной камеры до давления $\approx 0,01$ Па. Время остывания составляло 2 ч, после чего образец Мо-зеркала извлекался из вакуумной камеры.

Стенд для моделирования деградации водоохлаждаемых Мо-зеркал при взаимодействии с «холодным» паром (сценарий № 2). Прорыв воды в вакуумную камеру реактора может повлечь деградацию не только первого зеркала, но и других внутривакуумных зеркал, поэтому необходимо оценить, подвержены ли они деградации в ходе аварий. Как и в случае с водоохлаждаемым первым зеркалом, температуру таких зеркал при аварии можно принять равной температуре воды в контуре системы охлаждения, т.е. ≈ 100 °С [17]. Для моделирования данного сценария был изготовлен стенд, представленный на рис. 3.

Рис. 3. Схема (а) и фотография (б) стенда для исследования воздействия пара воды высокого давления (1,5 бар) на нагретое до ≈ 110 °С Мо-зеркало: 1 — нагреваемый сосуд; 2 — манометр; 3 — крышка сосуда; 4 — предохранительный клапан; 5 — держатель зеркала; 6 — зеркало; 7 — дистиллированная вода; 8 — термопарный измеритель температуры; 9 — электроплитка

Рис. 4. Схема (а) и фотография (б) стенда для исследования воздействия паров воды высокого давления на отражающую поверхность зеркала: 1 — нагреватель; 2 — запаянная трубка с водой; 3 — держатель зеркала; 4 — Мо-зеркало; 5 — рабочая камера; 6 — манометр; 7 — клапан; 8 — вакуумметр; 9 — диафрагменный насос

рабочей камеры до давления ≈ 10 Па, после чего клапан закрывался и включался нагреватель 1. При достижении температуры плавления припоя (≈ 190 °С) в рабочую камеру поступала вода. Её объем был рассчитан так, чтобы при температуре 250 °С давление пара составляло $\approx 1,5$ бар.

Стенд содержит нагреваемый сосуд 1 (скороварка), на крышке которого располагались деформационный манометр 2 и предохранительный клапан 4, настроенный на срабатывание при превышении давлением величины 2 бар. С внутренней стороны крышки подвешивался держатель 5 с образцом зеркала 6. Сосуд нагревался на электроплитке 9. Для измерения температуры сосуда использовался термопарный датчик 8. Мощность нагрева подбиралась таким образом, чтобы давление пара поддерживалось на отметке 1,5 бар. При этом температура сосуда, зеркала и пара составляла ≈ 110 °С.

Стенд для моделирования деградации Мо-зеркал в ходе steam event (сценарий № 3). Подробное описание сценария steam event представлено в [9]. Для его моделирования был изготовлен стенд, представленный на рис. 4.

Стенд включает в себя рабочую камеру 5, в которую помещается образец зеркала 4 и запаянная трубка 2 с необходимым количеством воды. Камера снабжена деформационным манометром 6 и соединена с откачной системой, построенной на базе диафрагменного насоса 9. Для герметизации используются уплотнения на основе металла, силикона и фторопласта, способные выдерживать нагрев до 300 °С. Рабочая камера размещалась на резистивном нагревателе 1.

При открытом клапане 7 проводилась откачка

Стенд для моделирования деградации Мо-зеркал при воздействии воды (сценарий № 4).

Особо стоит выделить аварийный сценарий, в ходе которого на отражающую поверхность будет воздействовать вода, что может наблюдаться, если течь в контуре охлаждения расположена в непосредственной близости от зеркала или если температура зеркала оказывается ниже точки росы. При моделировании температура зеркала и воды здесь оценивается $\approx 100^\circ\text{C}$. Схема и фотография стенда для исследования данного сценария представлены на рис. 5.

Стенд состоит из теплоизолированного сосуда 1 с дистиллированной водой 7. В воду помещался резистивный нагреватель 2, в качестве которого использовался бытовой кипятильник. Образцы зеркал 5 располагались на держателе 6, находившемся выше нагревателя (для обеспечения конвективного теплопереноса). Контроль температуры осуществлялся термомпарным измерителем 4. Мощность нагрева подбиралась таким образом, чтобы температура воды находилась чуть ниже температуры кипения ($\approx 97^\circ\text{C}$).

Для исследования возможности очистки зеркал после воздействия воды и пара был использован полноразмерный макет разрядной ячейки системы плазменной очистки зеркал диагностики «спекроскопия водородных линий» [12] в экваториальном порту № 11 установки ИТЭР. Используемые в настоящей работе образцы зеркал помещались в центре макета первого зеркала, в качестве которого выступала шлифованная Мо-пластина размером $200 \times 100 \times 3$ мм.

Для измерения спектральных зависимостей коэффициента зеркального отражения и коэффициента диффузного рассеяния в работе был использован спектрофотометр Perkin Elmer Lambda 850. Зеркальное отражение измерялось при использовании пучка света квадратного сечения (5×5 мм), угол падения составлял 8° . Измерение диффузного рассеяния проводилось с использованием интегрирующей сферы, снабжённой отверстием для выхода зеркально отражённого света, с относительной калибровкой на сертифицированный материал Spectralon.

Оценка изменения состояния поверхности образцов проводилась на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO MA 10.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 6 представлены зависимости коэффициентов зеркального отражения и диффузного рассеяния (на длине волны 656 нм — линия H_α) исследованных образцов Мо-зеркал от времени экспозиции в условиях, моделирующих рассмотренные аварийные сценарии.

Рис. 6. Изменение зеркального отражения (а) и диффузного рассеяния ($\lambda = 656$ нм) монокристаллического Мо-зеркала (б) при моделировании аварийных сценариев в ИТЭР: 1 — моделирование микротечи (сценарий № 1); 2 — моделирование воздействия на зеркало пара при температуре $\approx 100^\circ\text{C}$ (сценарий № 2); 3 — моделирование steam event (сценарий № 3); 4 — моделирование попадания на зеркало воды при температуре $\approx 100^\circ\text{C}$ (сценарий № 4)

Для сценариев № 3 и 4 при времени воздействия менее 2 ч оптические свойства Мо-зеркал практически не изменяются, для сценариев № 1 и 2 ухудшение оптического качества зеркал незначительно даже после 10 ч воздействия. Визуальный контроль показывает, что деградация начинается как точечный процесс: на поверхности зеркала появляются отдельные тёмные точки. При дальнейшей выдержке растут количество и размер таких точек. На рис. 7 представлены фотографии отражающей поверхности по мере роста времени воздействия воды.

Рис. 7. Фотографии отражающей поверхности Мо-зеркала после выдержки в воде при $T \approx 110$ °С, где время экспозиции в воде равно 3,5 (а), 5,5 (б), 10 ч (в)

Для анализа изменений, происходящих на отражающей поверхности Мо-зеркала, была проведена его электронная микроскопия. Обнаружено, что воздействие воды приводит к образованию диэлектрической плёнки, имеющей на начальном этапе островковую структуру. Электронно-микроскопические снимки поверхности показаны на рис. 8.

Рис. 8. Электронно-микроскопическая фотография отражающей поверхности Мо-зеркала после его выдержки в течение 3,5 ч в воде при $T \approx 100$ °С: а — до очистки поверхности электронным пучком; б — после очистки поверхности электронным пучком; красным выделена область, на которую фокусировался электронный пучок

Диэлектрический характер и малая толщина загрязнения подтверждаются тем, что его сканирование электронным пучком с повышенной плотностью тока (фокусировка пучка растрового электронного микроскопа на интересующем объекте) приводит к его удалению с поверхности зеркала (см. участок внутри красной окружности на рис. 8).

Как показали полученные результаты, скорость деградации Мо-зеркал в сценариях № 3 и 4 примерно одинакова, что позволяет моделировать однократное воздействие пара на Мо-зеркала в ходе steam event путём выдержки зеркала в дистиллированной воде при температуре ≈ 97 °С. Деградация в сценариях № 1 и 2 протекает крайне медленно. Это позволяет считать, что наличие микротечей в системе охлаждения внутри-вакуумных элементов реактора не вызовет серьёзного ухудшения оптического качества Мо-зеркал.

Проведём анализ кинетики процесса деградации Мо-зеркал. В табл. 2 представлены основные параметры взаимодействия воды и Мо в рассмотренных сценариях.

Т а б л и ц а. 2. Анализ кинетики процесса взаимодействия воды и Мо

Параметр	Пар (сценарий № 1)	Пар (сценарий № 2)	Пар (сценарий № 3)	Вода (сценарий № 4)
Температура зеркала, К	523	383	523	373
Давление, кПа	3	150	150	100
Плотность потока молекул воды на зеркало, $1/(m^2 \cdot c)$	$8,1 \cdot 10^{25}$	$4,8 \cdot 10^{27}$	$4,1 \cdot 10^{27}$	$5,5 \cdot 10^{30}$
Относительная скорость химической реакции	1	0,069	50	50

Скорость гетерогенной химической реакции между Мо (твёрдое вещество) и водой (жидкость или пар) пропорциональна плотности потока молекул воды на поверхность Мо-зеркала (Φ), а также функции от температуры зеркала $F(t)$:

$$V_{\text{Мо} + \text{H}_2\text{O}} = K\Phi F(t), \quad (1)$$

где K — коэффициент пропорциональности.

В нулевом приближении можно предположить, что температурная зависимость скорости реакции подчиняется правилу Вант—Гоффа

$$\frac{F(t_2)}{F(t_1)} \approx \gamma^{\frac{t_2 - t_1}{10}}, \quad (2)$$

где γ — температурный коэффициент реакции.

Исходя из того, что для зеркал, подвергнутых воздействию воды в сценариях № 3 и 4, скорость деградации оптического качества примерно одинакова, определим значение температурного коэффициента данной реакции

$$\gamma = \frac{t_2 - t_1}{10} \sqrt{\frac{\Phi_1}{\Phi_2}}. \quad (3)$$

Подставляя значения из табл. 2, получим, что $\gamma \approx 1,616$.

Рассчитаем относительную скорость реакции, принимая скорость деградации Мо-зеркал в ходе сценария № 1 за единицу:

$$V_{\text{отн}} = \frac{\Phi}{1,1 \cdot 10^{26}} \gamma^{\frac{t - 523}{10}}. \quad (4)$$

Таким образом, для снижения скорости деградации Мо-зеркал необходимо снизить их рабочую температуру, а в случае возникновения течи — как можно скорее снизить её интенсивность, что приведёт к снижению плотности потока воды на отражающую поверхность. Учитывая это, необходимо отметить, что согласно рис. 1 при возникновении события steam event большую часть времени температура зеркала будет ниже 150 °С, поэтому для деградации зеркала до состояния, достигнутого в приведённом здесь эксперименте, потребуется гораздо больше 10 ч.

Для проверки принципиальной возможности восстановления оптического качества Мо-зеркал после воздействия воды образец был выдержан в воде при $T \approx 97$ °С в течение 10 ч. После этого зеркало было подвергнуто очистке в полноразмерном макете разрядной ячейки системы плазменной очистки зеркал диагностики «спектроскопия водородных линий» [12]. В качестве рабочего газа использовался Ag (режим очистки: напряжение разряда $U_d \approx 500$ В, плотность тока на зеркало $j_d \approx 0,1$ mA/cm², давление $P_{\text{Ag}} \approx 5$ Па, длительность очистки $T = 2$ ч). На рис. 9 представлены спектральные зависимости зеркального отражения и диффузного рассеяния этих зеркал в исходном состоянии, после воздействия воды и после очистки.

Рис. 9. Оптические свойства монокристаллического Мо-зеркала: a — зеркальное отражение; b — диффузное рассеяние; 1 — исходное состояние; 2 — после выдержки в воде (≈ 97 °С, 10 ч); 3 — после очистки в Ag (2 ч); штриховкой выделена область рабочих длин волн диагностики «спектроскопия водородных линий»

Видно, что очистка с использованием Ar в качестве рабочего газа позволяет восстановить зеркальное отражение монокристаллических Mo -зеркал практически до исходного уровня в рабочем диапазоне длин волн диагностики «спектроскопия водородных линий» ($\lambda = 450\text{—}700\text{ нм}$). Диффузное рассеяние снижается, но всё же остаётся выше исходного значения. Это связано с неравномерным характером химической коррозии: распыление слоя загрязнения с неравномерной толщиной приводит к развитию рельефа поверхности. Величина диффузного рассеяния ограничивает пространственное разрешение диагностики, однако с точки зрения диагностики «спектроскопия водородных линий» полученные результаты можно считать приемлемыми.

На рис. 10 представлены фотографии изменения отражающей поверхности монокристаллического зеркала по мере его очистки. Таким образом показано, что очистка Mo -зеркал после воздействия воды может быть осуществлена при использовании газового разряда постоянного тока.

Рис. 10. Фотографии отражающей поверхности Mo -зеркала: *a* — после выдержки в воде при $T \approx 100\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 10 ч; *б* — после очистки в течение 1 ч (Ar); *в* — после очистки в течение 2 ч (Ar)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что деградация Mo -зеркал имеет место во всех рассмотренных сценариях воздействия воды и пара на отражающую поверхность Mo -зеркал. При этом на отражающей поверхности происходит рост оксидной плёнки, приводящей к снижению зеркального отражения и росту диффузного рассеяния. Компонентный состав формируемых в рассматриваемых условиях загрязнений требует дополнительных исследований.

Для сценариев № 1 и 2 скорость деградации мала: за 10 ч коэффициент зеркального отражения снизился на 2—3% в видимой области спектра. Это позволяет считать, что данные сценарии не представляют серьёзной опасности для функционирования оптической диагностики, использующей Mo -зеркала.

Для сценариев № 3 и 4 наблюдается другая ситуация: при времени выдержки более 2 ч оптическое качество зеркала начинает быстро ухудшаться. За 7—8 ч зеркальное отражение снижается примерно в 2 раза. При этом для одного цикла воздействия динамика изменения оптического качества зеркал в данных сценариях очень близка. Этот факт позволил оценить значение температурного коэффициента реакции взаимодействия Mo с водой $\gamma \approx 1,616$. Таким образом, доступным для разработчиков оптических диагностик способом увеличения стойкости Mo -зеркал к воздействию воды и пара является снижение их рабочей температуры.

Результаты проведённых экспериментов по очистке подтвердили возможность восстановления оптического качества Mo -зеркал после воздействия воды при использовании плазменной системы очистки на основе газового разряда постоянного тока. В ближайшее время планируется провести дополнительную серию экспериментов для сравнения очистки Mo -зеркал при использовании в качестве плазмообразующего газа He и H_2 на постоянном и импульсном токе, а также выбора режима очистки, наиболее благоприятного с точки зрения сохранения оптического качества зеркал.

Работа выполнена при поддержке ГК «Росатом», государственный контракт № Н.4а.241.19.18.1027 от 19.04.2018.

REFERENCES

1. **Litnovsky A., Voitsenya V.S., Costley A., Donne A.J.H.** First mirrors for diagnostic systems of ITER. — Nuclear Fusion, 2007, vol. 47, № 8, pp. 833—838.
2. **Litnovsky A., Wienhold P., Philipps V. et al.** Diagnostic mirrors for ITER: a material choice and the impact of erosion and deposition on their performance. — J. of Nucl. Mater., 2007, vol. 363—365, pp. 1395—1402.
3. **Orlovskiy I., Alekseev A., Andreenko E. et al.** Thermal testing of the first mirror unit mock-up for H-alpha and visible spectroscopy in ITER. — Fusion Engineering and Design, 2015, vol. 96—97, pp. 899—902.
4. **Rogov A.V.** The problem of first mirror for optical diagnostics in ITER. — Lambert Academic Publishing, 2011. 140 p.
5. **Cox P.A.** Transition Metal Oxides. An Introduction to their Electronic Structure and Properties. — Oxford: Clarendon Press, 1992. 284 p.
6. **Molybdenum.** Collection. Edited by Natanson A.K. — M.: Pub.house of Inostr. lit. (Foreign lit.), 1959. 304 p. (in Russian).
7. **Maquet P.** LOCA-Environmental Conditions. Report. Ver. 1.0. 2016. 9 p. IDM UID: SSJMRE.
8. **Topilski L.** Accident Analysis Report. Volume II — Figures. Report. Ver. 4.7. 2010. 100 p. IDM UID: 2EBGU5.
9. **Kocan M.** Specification of the Steam and Humidity Test of the WAVS Optical Samples. Report. Ver. 1.6. 2016. 5 p. IDM UID: RZC73S.
10. **Almazan R.M., Gomez L.J., Lopez R. et al.** Test report — Steam Ingress and Humidity Test of the WAVS Optical Samples. Report. 2017. 98 p. IDM UID: UVXNCU.
11. **Design Requirements and Guidelines Level 2 (DRG2).** ITER Document. 2001. 477 p. G A0 GDRD 3 01-07-19 R1.0.
12. **Rogov A.V., Kapustin Yu.V.** Development of diagnostic mirror cleaning system in ITER based on the combined discharge configuration «hollow cathode—Penning cell». — Uspekhi prikladnoy fiziki (Advances in applied physics), 2016, vol. 4, № 3, pp. 240—247 (in Russian).
13. **Dmitriev A.M., Babinov N.A., Bazhenov A.N. et al.** In-situ plasma cleaning of ITER diagnostic mirrors in noble-gas RF discharge. — Phys. Scr., 2017, vol. 170, 014072. 5 p.
14. **Antonov N.** PDR DA System Design Description 55.E2 H-Alpha and Visible Spec. DA Design Description Document, 2017. 209 p. IDM UID: TWRHG4.
15. **Von Hellermann M.G., Barnsley R., Biel W. et al.** Active beam spectroscopy for ITER. — Nucl. Instr. & Meth. in Phys. Research Section A, 2010, vol. 623, № 2, pp. 720—725.
16. **Winkel T., Orchard J.** Leak evaluation in JET and its consequences for future fusion machines. — Vacuum, 1990, vol. 41, № 7—9, pp. 1988—1991. DOI: 10.1016/0042-207X(90)94153-H.
17. **Summary of the ITER Final Design Report.** ITER EDA Documentation Series № 22, 2001. 88 p. G A0 FDR 2 01-12-19 W0.1.

AUTHORS

Kapustin Yu.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Fusion Centre, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Kapustin_YV@nrcki.ru

Rogov A.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Fusion Centre, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; alex-rogov@yandex.ru

Received 28 October 2018

Revised 10 December 2018

Accepted 18 December 2018

Problems of Atomic Science and Technology

Ser. Thermonuclear Fusion, 2019, vol. 42, issue 1, pp. 57—65