

УДК 538.971

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ВОЛЬФРАМОВЫХ МИШЕНЕЙ ДИВЕРТОРА ПРИ МОЩНЫХ ПЛАЗМЕННО-ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗКАХ, ОЖИДАЕМЫХ В ИТЭР И ТОКАМАКАХ РЕАКТОРНОГО МАСШТАБА (ОБЗОР)

В.П. Будаев

НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Тепловые нагрузки на вольфрамовые мишени дивертора в ИТЭР и токамаках реакторного масштаба в стационарной стадии DT-разряда будут достигать $\sim 10 \text{ МВт}\cdot\text{м}^{-2}$, а при срывах плазмы и ЭЛМах импульсные кратковременные нагрузки будут увеличиваться до $\sim 0,6\text{—}3,5 \text{ ГВт}\cdot\text{м}^{-2}$. В обзоре изложены результаты исследований поведения вольфрама при таких плазменно-тепловых нагрузках. Основное внимание уделяется описанию микроструктуры поверхности, рекристаллизации и морфологии трещин мишени. Наблюдаются плавление и растрескивание вольфрама, капельная эрозия, формирование неоднородных и пористых слоёв на поверхности материала. Обсуждается формирование вольфрамовой пыли субмикронного размера и влияние неоднородной вольфрамовой поверхности на взаимодействие плазма—стенка. Отмечается необходимость дополнительных испытаний и изучения стойкости вольфрама в условиях повышенных импульсных плазменных нагрузок на диверторные пластины ИТЭР, в том числе при срывах плазмы и ЭЛМах.

Ключевые слова: материалы термоядерного реактора, вольфрам, плазменно-тепловые испытания, токамак, ИТЭР.

RESULTS OF HIGH HEAT FLUX TUNGSTEN DIVERTOR TARGET TESTS UNDER ITER AND REACTOR TOKAMAK-RELEVANT PLASMA HEAT LOADS (REVIEW)

V.P. Budaev

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

Heat loads on the tungsten divertor targets in ITER and tokamak power reactors at the steady state of DT discharges will reach $\sim 10 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$, increasing up to $\sim 0,6\text{—}3,5 \text{ GW}\cdot\text{m}^{-2}$ under disruptions and ELMs. The results of high heat flux tests (HHFT) of tungsten under such transient heat loads are reviewed in the paper. Effects of melting, cracking, drop erosion of the surface, formation of corrugated and porous layers were observed. Microstructure and cracking of recrystallized and resolidified layers are described. Problems of micron-size tungsten dust production and plasma-surface interaction are discussed. In conclusion, the necessity of additional HHFTs and investigations of tungsten under ITER-relevant transient heat loads are noted.

Key words: nuclear fusion materials, tungsten, high heat flux plasma tests, tokamak, ITER.

ВВЕДЕНИЕ

Вольфрам планируется использовать для изготовления компонентов первой стенки в установках реакторного масштаба: в ИТЭР будет эксплуатироваться вольфрамовый дивертор (рис. 1), рассматриваются вопросы использования вольфрама в термоядерном источнике нейтронов (ТИН) и реакторе ДЕМО. Эксплуатация вольфрамового дивертора ИТЭР требует дополнительных испытаний и изучения стойкости вольфрама в условиях повышенных импульсных плазменных нагрузок, в том числе срывов, ЭЛМов (англ. ELMs-edge localized modes) и др. [1—4]. Исследование стойкости вольфрама при мощных плазменно-тепловых нагрузках осуществляется и планируется в экспериментах на токамаках JET, AUG, Alcator C-Mod, T-10, стеллараторе LHD, линейных плазменных установках, импульсных плазменных ускорителях типа КСПУ-Т, в электронно- и ионно-лучевых установках, в лазерных экспериментах [4—7].

Тепловые нагрузки на пластины дивертора в токамаке масштаба ИТЭР в стационарной стадии DT-разряда будут достигать $\sim 10 \text{ МВт}\cdot\text{м}^{-2}$, приводя к повышению температуры пластин в среднем до $\sim 1100 \text{ }^\circ\text{C}$; в срывах и ЭЛМах импульсные кратковременные нагрузки на диверторные пластины будут достигать величины гигаваттного масштаба $0,6\text{—}3,5 \text{ ГВт}\cdot\text{м}^{-2}$ [8], что будет вызывать

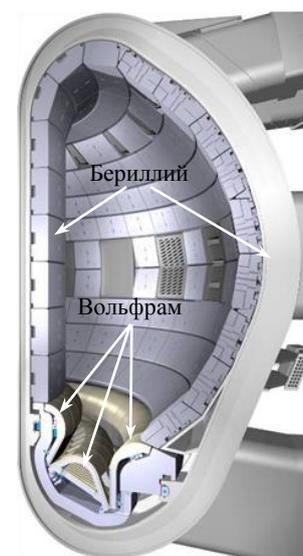


Рис. 1. В ИТЭР диверторные пластины будут изготовлены из вольфрама, общая площадь пластин $\sim 150 \text{ м}^2$

периодически повышения температуры материала до более высокой температуры [9]. При использовании вольфрама в качестве пластин дивертора такие мощные нагрузки могут привести к перегреву поверхности и даже плавлению вольфрама [4—7]. При циклических мощных тепловых нагрузках при воздействии ЭЛМов температура поверхности вольфрамовых пластин может превышать температуру рекристаллизации, что, как известно в металлургии [10], приводит к изменению микроструктуры вольфрама, росту зёрен, ухудшению механических свойств и охрупчиванию. Поэтому необходимо оценить последствия возможного плавления и растрескивания вольфрама, рекристаллизации поверхностных слоёв, образования пылевых частиц после разрушения таких слоёв, формирования неоднородных и пористых слоёв на поверхности вольфрамовых пластин в ИТЭР при критических и субкритических тепловых нагрузках. Определение всех характеристик стойкости вольфрама при мощных плазменно-тепловых нагрузках важно также для решения проблемы первой стенки в термоядерных установках следующего поколения, планируемых к сооружению в России (ТИН, ДЕМО).

При исследовании вольфрама необходимо рассматривать следующие вопросы взаимодействия плазма—стенка в термоядерном реакторе:

- длительность эксплуатации стенки (физическое/химическое распыление, эрозия, пересаживание, растрескивание материала, нейтронная нагрузка);
- модификация структуры поверхности материала стенки (изменение теплопроводности и условий плавления, рекристаллизация и др.);
- захват трития в поверхностных слоях (пересаживанные пористые слои);
- формирование пыли при разрушении поверхности и влияние пылевых частиц на плазму;
- радиационные повреждения материала в условиях нейтронной нагрузки [11—14] (в нашем обзоре эти вопросы не рассматриваются).

Плазменно-тепловые нагрузки на вольфрам в экспериментах на современных крупных токамаках (JET, AUG) и стеллараторе LHD не достигают уровня нагрузок, ожидаемых в ИТЭР. Поэтому испытание и исследование материалов в условиях интенсивного плазменного, корпускулярного и лазерного облучения в настоящее время ведётся также на других установках, например, в работах [15—18] даётся обзор различных методов таких испытаний. В квазистационарных плазменных ускорителях типа КСПУ-Т [19, 20], КСПУ-Ве, КСПУ-Х50 [21] тестовые образцы подвергаются облучению мощными импульсными плазменными потоками с плотностью мощности до $5 \text{ ГВт}\cdot\text{м}^{-2}$ и длительностью менее миллисекунды, что имитирует уровень тепловой нагрузки на диверторные пластины ИТЭР. В установках с электронным пучком (JUDITH-2 в Германии [22], IDTF в России [23], FE200 в Европе, JEBIS в Японии [24] и др.) используется электронный пучок высокой мощности (например, в JUDITH-2 до 200 кВт, в IDTF до 800 кВт, в JEBIS до 60 кВт), сканирование которого по поверхности образца обеспечивает облучение большой тепловой мощностью. Установки с вытягиванием ионного пучка из сильноточного разряда типа Magnum-PSI [25], MARION [26], PISCES [27], Pilot-PSI [28] позволяют получать плотность мощности облучения до $20 \text{ МВт}\cdot\text{м}^{-2}$ в стационарном режиме в течение десятков и сотен секунд. В России испытания вольфрама проводятся также в установках ГОЛ-3 [29], СОПМАТТ [18].

Имитация воздействия ЭЛМов в ИТЭР (т.е. совмещение мощной стационарной и импульсной нагрузок на тестовые образцы) является сложной задачей. В установке Magnum-PSI используется режим резкого импульсного увеличения мощности плазменного разряда продолжительностью до 100 с. В установке NAGDIS-II используется инжекция плазменного сгустка из коаксиального плазменного ускорителя [30] в стационарный плазменный разряд.

В последние годы опубликовано несколько обзоров о характеристиках вольфрама после плазменных и тепловых испытаний [4, 22]. В этих обзорах отражены результаты, в основном, связанные с необходимостью решить текущие инженерные проблемы изготовления элементов первой стенки и моноблоков дивертора ИТЭР, рассмотрены такие вопросы, как теплопроводность и пластичность при термических и плазменных нагрузках, блистеринг — изменение морфологии поверхности материала при бомбардировке ионами плазмы (D, T, He) [4]. Вместе с тем в этих обзорах слабо отражены или не изложены результаты исследования изменений микроструктуры вольфрама, поверхностных эффектов, капельной эрозии и анализ возможных последствий воздействия мощных плазменных нагрузок в установке реакторного масштаба. Данный обзор восполняет такой пробел, уделяя особое внимание свойствам микроструктуры

поверхности вольфрама после мощных плазменно-тепловых нагрузок. Нагрузки на вольфрам при воздействии срывов и ЭЛМов в ИТЭР, кроме плавления, растрескивания и эрозии материала, будут приводить к изменению микроструктуры после отверждения расплавленной и рекристаллизации поверхности вольфрама, а также к переосаждению вольфрама в виде неоднородных слоёв. Экспериментальные [19, 31—34] и теоретические работы [35] последних лет показали необходимость подробно исследовать эффект капельной эрозии (эжекции капель с поверхности расплавленного вольфрама). Все эти перечисленные процессы могут стать причиной значительного изменения физико-химических свойств поверхности, деградации стойкости диверторных пластин, приводить к повышенной сорбции трития в них. Хрупкое разрушение переотверждённых слоёв может формировать частицы субмикронного размера, которые при поступлении в плазму могут негативно влиять на свойства разряда и взаимодействие плазма—стенка. Поэтому проблема формирования пыли в термоядерном реакторе тесно связана с вопросами изменения микроструктуры поверхности вольфрамовых пластин в диверторе.

Настоящий обзор не претендует на максимальную полноту описания и окончательный анализ всех полученных экспериментальных данных. Цель обзора — привлечь внимание к наиболее острым критическим вопросам взаимодействия плазмы с вольфрамом в токамаке, которые остаются нерешёнными и на которые следует обратить внимание в будущих исследованиях и испытаниях. Основное внимание в обзоре уделено изложению результатов исследования микроструктуры, в том числе после отверждения расплавленной поверхности вольфрама. Несмотря на то, что в различных установках (плазменных, корпускулярных, лазерных) глубина проникновения частиц в поверхность и процессы переноса тепла на поверхность отличаются, в целом в литературе [17] отмечается подобие поведения материала при больших нагрузках, в том числе схожесть пороговых характеристик разрушения, изменения структуры при рекристаллизации и после отверждения расплавленного слоя. В обзоре мы приводим экспериментальные данные, которые могут рассматриваться в пользу такого обобщения, отмечая вместе с тем, что окончательная классификация всех процессов разрушения вольфрама при мощных плазменно-тепловых нагрузках ещё не выработана.

В обзоре также кратко изложены ожидаемые плазменно-тепловые нагрузки на материалы первой стенки ИТЭР, экспериментальные наблюдения плавления, растрескивания, эрозии, переосаждения вольфрама, вопросы захвата трития в поверхностных слоях, полученные в последние годы результаты исследования пыли микронного и субмикронного размера и связанные с этим физические механизмы образования вольфрамовой пыли, формирования пористых слоёв в He-плазме, которые могут значительно влиять на порог разрушения поверхности. Обсуждаются полученные в экспериментах на токамаках результаты влияния вольфрама на свойства плазмы и взаимодействие плазма—стенка в токамаке.

ОЖИДАЕМЫЕ ПЛАЗМЕННО-ТЕПЛОВЫЕ НАГРУЗКИ НА МАТЕРИАЛЫ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ИТЭР

Взаимодействие плазмы с первой стенкой в токамаке будет в значительной мере определять производительность реактора и срок его службы [36]. Материал диверторных пластин будет подвергаться тепловой нагрузке, которая будет максимальной в зоне соприкосновения магнитной сепаратрисы с диверторными пластинами. Экспериментальные и теоретические исследования показали, что в токамаке реакторного масштаба повышенные тепловые нагрузки на материальную стенку будут возникать в стационарной стадии разряда, а также при импульсных воздействиях в период срывов и ЭЛМов (в английской литературе такие процессы называются «transient events», в российской литературе используют иногда термин «переходные процессы», но более точный перевод — «быстрые процессы»). Последствия стационарного и импульсного теплового воздействия на вольфрамовые пластины различаются, что обусловило различные методики испытания вольфрама для ИТЭР.

В сильном магнитном поле токамака продольная теплопроводность значительно больше поперечной и пространственное распределение тепловой нагрузки на материальные поверхности дивертора зависит от радиального (т.е. в направлении поперёк магнитного поля) распределения тепловых потоков. Потоки тепла в диверторном объёме плазмы носят существенно трёхмерный характер. Тепловой поток из центральной плазмы, достигая зоны сепаратрисы, в диверторном объёме распределяется вдоль магнитного поля и в радиальном направлении, что приводит к радиальной зависимо-

сти потока тепла на диверторные пластины. В результате импульсных процессов (срывов, ЭЛМов и других событий, в том числе формирования пучков) образуется тороидальная и полоидальная асимметрия тепловых потоков из плазмы на стенку, т.е. распределение тепловых нагрузок на материальную стенку токамака значительно неоднородное, существуют зоны повышенной тепловой нагрузки на материальные поверхности внутрикамерных элементов токамака.

Эффективная теплопроводность в диверторном объёме не описывается классической теорией переноса тепла в плазме. Перенос тепла из плазмы на стенку вдоль магнитного поля зависит от многих параметров [37, 38], в том числе от состояния поверхности материальной стенки (см. обсуждение далее). Достаточно полная теоретическая модель, описывающая диверторную плазму в токамаке, отсутствует. Описание диверторной плазмы в ИТЭР в настоящее время основывается на результатах численных кодов, которые используют модели различной степени детальности, например, компьютерный код SOLPS4.3 [39]. В таких расчётах достаточно точная оценка тепловых потоков на материальные пластины дивертора зависит от многих предположений и условий, которые окончательно не определены для всех режимов ИТЭР. Поэтому приоритет отдаётся оценке тепловых потоков в диверторной плазме и тепловой нагрузки на диверторные пластины в ИТЭР, исходя из полученных экспериментальных данных на современных токамаках и теоретических моделей с привлечением представлений об общих закономерностях процессов переноса в плазме токамака. Это позволяет выявить наиболее важные параметры критической тепловой нагрузки на материальные пластины дивертора токамака. Исходя из планов работы ИТЭР, различают повышенные нагрузки в H-моде в первой фазе (неактивной с использованием H и He, а также DD-фазу, когда планируется разработать схему применения управления ЭЛМами) и второй фазе с DT-смесью [9]. Подробное описание результатов исследования физики и ожидаемых параметров плазмы в ИТЭР, в том числе в диверторном объёме, приводится в обзорных работах [9, 40] и ссылках в них. В этом разделе приводятся некоторые результаты, которые определяют уровень критических нагрузок на вольфрамовые пластины облицовки дивертора в ИТЭР.

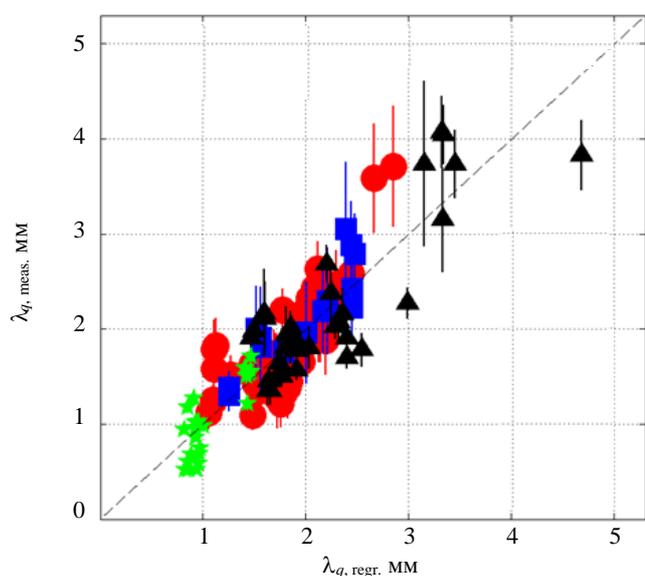


Рис. 2. Проверка скейлинга Голдстона для ширины слоя тепловой нагрузки $\lambda_{q, \text{regr.}} [\text{мм}] = (0,7 \pm 0,2) B_{\text{tor}}^{-0,77 \pm 0,14} q_{95}^{1,05 \pm 0,13} P_{\text{SOL}}^{0,09 \pm 0,08} R_{\text{geo}}^{0 \pm 0,1}$ (---) в экспериментах на токамаках JET (●), C-Mod (★), AUG (■), D-III-D, $R^2 = 0,77 \text{ м}^2$ (▲) [37]

В стационарной стадии разряда тепловая нагрузка на диверторные пластины будет определяться аномальным переносом плазмы поперёк магнитного поля. В радиальном направлении тепловая нагрузка на диверторные пластины будет уменьшаться. Размер слоя, на котором уровень нагрузки упадёт в e -раз (так называемый масштаб λ_q), является интегральной характеристикой пиковой тепловой нагрузки на материальную стенку токамака, т.е. подавляющая часть теплового потока будет осаждаться из плазмы на стенку в радиальном слое шириной λ_q . Экспериментальные наблюдения и теоретические оценки показали, что в современных крупных токамаках λ_q масштаб составляет величину 1—5 мм (рис. 2) [37].

Ширина слоя (масштаб λ_q) описывается скейлингом Голдстона, который рассматривает перенос тепла в периферийной плазме в рамках дрейфовой модели:

$$\lambda = 5671 P_{\text{SOL}}^{1/8} \frac{(1+k^2)^{5/8} a^{17/8} B^{1/4}}{I_p^{9/8} R} \left(\frac{2\bar{A}}{\bar{Z}^2(1+\bar{Z})} \right)^{7/16} \left(\frac{Z_{\text{эф}} + 4}{5} \right)^{1,8}, \text{ все единицы в системе СИ.} \quad (1)$$

В рамках этой модели предсказание для ИТЭР в разрядах с DT-плазмой $\lambda_q \cong 1,1$ мм при следующих параметрах разряда: ток плазмы 15 МА, мощность теплового потока, выносимого из центральной зоны токамака в пристеночную плазму, $P_{\text{SOL}} = 100$ МВт. Для разрядов ИТЭР при токе плазмы 7,5 МА, $P_{\text{SOL}} = 60$ МВт с

Не-плазмой масштаб $\lambda_q \cong 1,3$, с D-плазмой масштаб $\lambda_q \cong 3$ мм. Таким образом, ширина слоя в ИТЭР ($\lambda_q = 1—3$ мм) будет меньше, чем в современных токамаках, а тепловые нагрузки на материал дивертора будут больше. Мощность потока тепла на диверторные пластины оценивается по формуле

$$q_{\parallel} \sim P_{\text{SOL}} / (4\pi R \lambda_q B_q / B). \quad (2)$$

Оценки тепловых нагрузок в ИТЭР по формуле (2) дают величину $q_{\parallel} \sim 600—3000$ МВт·м⁻². Эта величина значительно превышает инженерные требования, выдвигаемые к максимальной тепловой нагрузке на материалы ИТЭР, которая принимается в инженерных расчётах ~ 10 МВт·м⁻².

Для уменьшения тепловой нагрузки предлагается распределение магнитного потока по поверхности в диверторе, что может уменьшить плотность потока тепла на пластины в ~ 7 раз. Наклон магнитных линий к поверхности пластин под углом $\sim 3^\circ$ уменьшает поток тепла в ~ 20 раз. Но эти меры не уменьшают поток тепла на материальную поверхность дивертора ниже критического, уровень стационарных тепловых потоков на материал дивертора ожидается в диапазоне от ~ 5 до ~ 30 МВт·м⁻². Таким образом, диверторные пластины ИТЭР могут подвергаться серьёзной тепловой нагрузке на масштабе нескольких миллиметров вблизи зоны последней замкнутой поверхности (сепаратрисы).

При импульсной тепловой нагрузке в срыве или воздействии одиночного события ЭЛМа [41, 42] поверхность материала, обращённого к плазме, испытывает кратковременный нагрев в течение периода меньше миллисекунды [8, 9]. Процессы теплопереноса в поверхностных слоях материала в этот кратковременный период имеют нестационарный и нелокальный характер, они характеризуются суммарной энергией W , поглощённой материалом, площадью облучения S и временем импульса воздействия τ . Поэтому в литературе используют в качестве характеристики тепловой нагрузки на материал следующие параметры: плотность мощности $W/(S\tau)$ в единицах измерения МВт·м⁻² (что более подходит для характеристики стационарных тепловых потоков); поток энергии за одно событие W/S в МДж·м⁻² (характеризует импульсные нагрузки); фактор тепловой нагрузки $F_{\text{HF}} = W/(S\tau^{-1/2})$, выраженный в единицах МДж·м⁻²·с^{-0,5} и отражающий диффузное поглощение тепла поверхностью за период импульсной тепловой нагрузки. Фактор тепловой нагрузки F_{HF} в плазменных экспериментах при анализе результатов испытаний следует сравнивать с фактором плавления вольфрама W (известным в металлургии), который равен ~ 50 МДж·м⁻²·с^{-0,5}.

Оценки показывают, что в ИТЭР энергетические потери в единичном ЭЛМе могут достигать $\Delta W_{\text{ELM}} \sim 1$ МДж, что соответствует $\sim 3\%$ запасённой в плазме энергии [9], длительность одного события ЭЛМа может достигать 0,5 мс. Тепловая нагрузка на диверторные пластины, вызванная ЭЛМами в ИТЭР, рассчитывается в моделях с использованием подходов нелинейной МГД численным кодом JOREK [43, 44].

Численное моделирование кодом JOREK показало, что имеются два механизма потока энергии из плазмы на первую стенку при ЭЛМах. Один из них — потеря энергии плазмой в сильно возмущённом магнитном поле (потери проводимостью, от англ. conductive losses). Другой — распространение плазменных филаментов (плазменных образований — аналог солнечных вспышек), которые движутся радиально из плазмы на стенку. При движении таких филаментов радиально энергия и частицы уходят в параллельном направлении вдоль магнитного поля на диверторные пластины и первую стенку токамака, приводя к импульсной тепловой нагрузке до $0,5—3,5$ ГВт·м⁻² (рис. 3).

В ИТЭР предлагается схема управления ЭЛМами [8], которая предполагает уменьшить

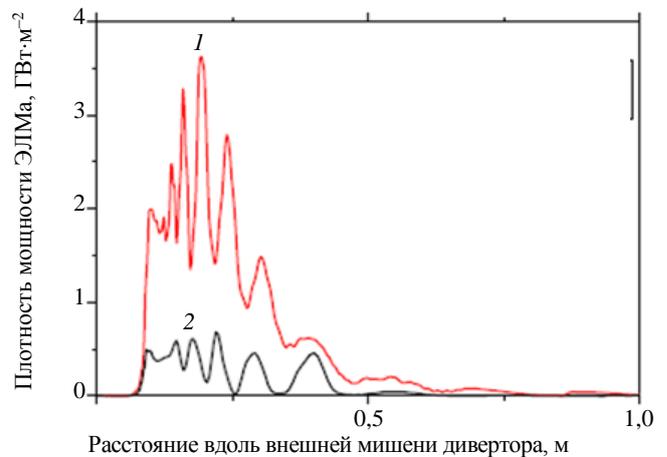


Рис. 3. Тепловой поток на диверторную пластину при воздействии ЭЛМа с энергией 4 МДж (1) (потери проводимости из-за возмущения магнитного поля) и 1,5 МДж (2) (конвекция — распространение плазменных филаментов) в зависимости от расстояния вдоль диверторной пластины. Моделирование кодом JOREK [44]

частоту ЭЛМов с помощью дополнительных обмоток, устанавливаемых в камере ИТЭР. Предварительные расчёты показывают, что для достижения низкой аккумуляции вольфрама в плазме ИТЭР (т.е. низких радиационных потерь, что необходимо для поддержания Н-моды) необходимо достижение фактора $f_{ELM} \cdot \phi_E = 25—50$, где f_{ELM} — частота ЭЛМов, ϕ_E — время удержания ЭЛМов. Частота ЭЛМов в Н-моды ИТЭР оценивается по результатам моделирования $f_{ELM} = 20—25$ Гц [8].

Современное состояние исследований срывов и убегающих электронов, ожидаемых в ИТЭР, а также методы воздействия на них изложены в обзорах [42, 45].

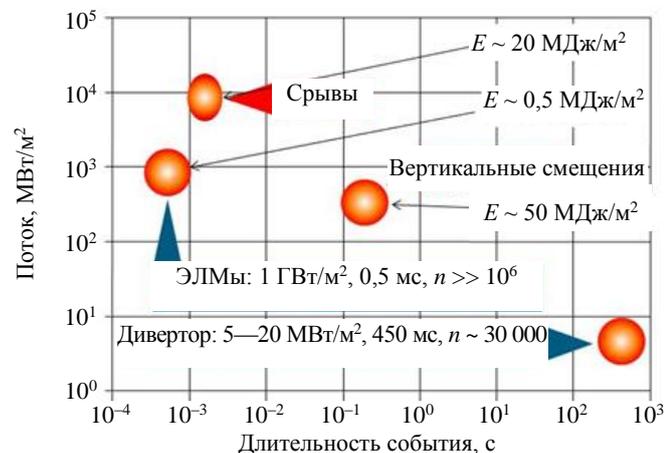


Рис. 4. Ожидаемые тепловые нагрузки в ИТЭР: ● — критические нагрузки

планировалось изготовить из бериллия. Такая потенциальная возможность критических нагрузок может поставить вопрос о замене бериллиевой облицовки на вольфрамовую в этой части первой стенки.

Комбинированные эффекты тепла и частиц могут усиливать разрушение поверхности и эрозию при импульсной нагрузке в некоторых случаях [4]. Вместе с тем появились обнадеживающие экспериментальные результаты, показывающие ограничение разрушения поверхности вольфрамовой пористой поверхностью (типа пух — англ. fuzz) и порами от воздействия ионов He [4].

ПЛАВЛЕНИЕ, РАСТРЕСКИВАНИЕ, ЭРОЗИЯ, ПЕРЕОСАЖДЕНИЕ ВОЛЬФРАМА

Строгая классификация процессов разрушения вольфрама при мощных плазменно-тепловых нагрузках в термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы (токамаках, стеллараторах и линейных установках) до настоящего времени окончательно не выработана. Это связано с относительно небольшим объёмом данных, полученных в экспериментах с вольфрамом на термоядерных установках. Общие подходы к такой классификации строятся на анализе процессов разрушения, известных в металлургии, а также анализе данных, полученных при испытаниях вольфрама в нетермоядерных установках, обеспечивающих интенсивное плазменное, корпускулярное и лазерное облучение. Следует отметить, что процессы разрушения материалов в таких установках не вполне идентичны процессам, происходящим при взаимодействии плазма—стенка в термоядерных установках с магнитным удержанием. Это связано с наличием сильного магнитного поля в токамаках и стеллараторах, свойствами взаимодействия плазма—стенка в них, в том числе аномальным переносом энергии и частиц в плазме и из плазмы на поверхность, свойствами анизотропии переноса, вызванной магнитным полем, состоянием поверхности (свойства эмиссии, проводимость, теплопроводность) и связанной с этим состоянием приповерхностной плазмой, протеканием токов из плазмы на поверхность, по поверхностным слоям и расплавам [49—51].

Общие подходы к классификации процессов эрозии и разрушения вольфрама в условиях мощной плазменной нагрузки в токамаках обычно в литературе рассматриваются, исходя из экспериментов прошлых десятилетий на нетермоядерных установках и теоретических представлений о поведении металлов при повышенных тепловых нагрузках. Ввиду сложности вопроса для токамаков рассматриваются отдельно несколько механизмов, которые представляются важными, что позволяет продвинуться в понимании проблемы. При этом рассматриваются следующие эффекты [51]:

- при стационарных плазменных нагрузках в разряде, когда разрушение мало:
 - распыление поверхности материала ионами перезарядки, изотопами водорода и примесей;
 - воздействие униполярных дуг;
- при воздействии ЭЛМов, срывов:
 - растрескивание, опасное для механической прочности;
 - плавление поверхностного слоя;
 - неустойчивость расплавленного слоя с формированием волнового рельефа, шероховатости;
 - перенос расплавленного металла по поверхности (наиболее сильная локальная эрозия);
 - капельная эрозия (основной механизм потери материала с расплавленной поверхности);
- испарение и кипение, приводящие к эрозии (достигается редко при сверхвысоких потоках мощности);
- рекристаллизация и отверждение расплавленного слоя:
 - охрупчивание;
 - изменение рельефа при отверждении расплавленного слоя;
- при термоциклировании (периодическом повышении температуры материала):
 - усталостное разрушение, растрескивание (деградация механической прочности).

Перечисленные эффекты могут быть дополнены на основе новых экспериментальных данных, получаемых в последние годы, в том числе при комбинировании перечисленных эффектов. Далее приводится краткий обзор эффектов растрескивания и эрозии, наиболее часто обсуждаемых в литературе в последние годы [4, 7, 17, 52—64].

В литературе обсуждаются ([5, 7] и ссылки в них) два механизма формирования трещин в металле при импульсной термической нагрузке:

- напряжение, возникающее при отверждении расплавленного слоя;
- напряжение, возникающее при рекристаллизации нагретого слоя.

Эти напряжения могут эволюционировать при циклических, т.е. периодически повторяющихся, термических воздействиях на металл. Поскольку при ЭЛМах в токамаке возникают такие импульсные периодические нагрузки с частотой несколько герц, то испытания макетов диверторной облицовки проводятся в режиме термоциклирования. Для дивертора ИТЭР выбор марки вольфрама и конструкции моноблока проводился на основе термоциклических и термоударных испытаний [52]. В последние годы активно обсуждаются вопросы улучшения конструкции таких моноблоков, учитывая новые данные испытаний вольфрама при мощных плазменно-тепловых нагрузках [65].

Испытания при стационарных и квазистационарных нагрузках (термоциклирование). Испытание вольфрамовых моноблоков ИТЭР (рис. 5, а), изготовленных из различных сортов вольфрама, электронными пучками в установке IDTF (НИИЭФА) и других установках Европы и Японии показали, что они растрескиваются при термоциклировании ([20, 65—74] и ссылки в них). Типичные параметры таких

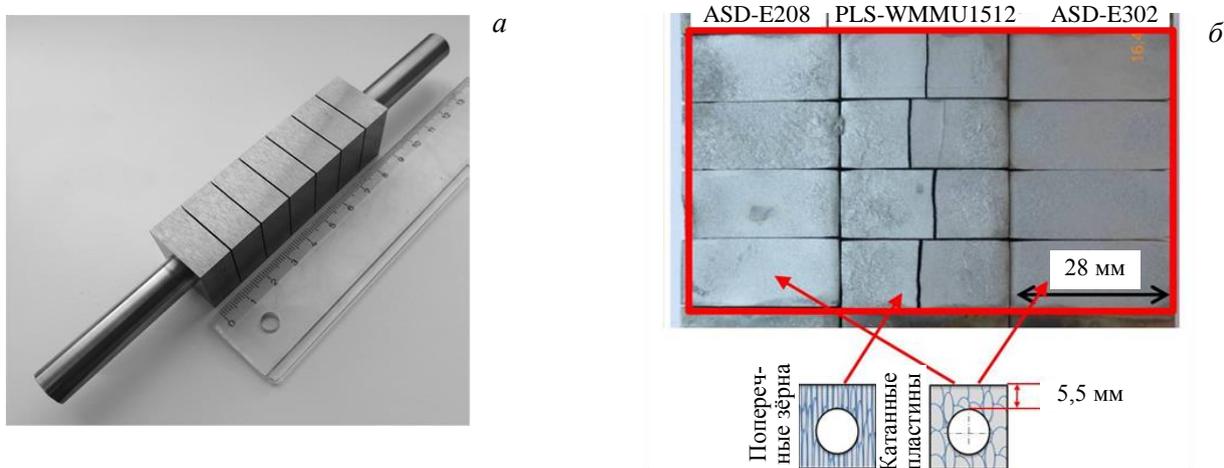


Рис. 5. Моноблоки диверторной облицовки ИТЭР: а — общий вид сборки из семи сегментов, при испытаниях охлаждаемые трубкой из CuCrZr; б — моноблоки, изготовленные из различных сортов вольфрама марки ASD и PLS, после испытания термоциклированием мощными электронными пучками. Схематично показана структура моноблоков с соответствующей поперечной и продольной структурой зёрен (внизу)

испытаний: температура поверхности $\sim 1000\text{--}1500\text{ }^\circ\text{C}$ (т.е. в диапазоне температуры ниже и выше температуры рекристаллизации вольфрама), средняя мощность нагрузки $10\text{--}20\text{ МВт}\cdot\text{м}^{-2}$ в серии экспериментов от 5000 до 18 000 импульсов длительностью около 0,5 мс (ожидаемая длительность одиночного ЭЛМа в ИТЭР), максимальная энергия в импульсе может достигать $0,1\text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}$. Крупномасштабное растрескивание (раскалывание) наблюдалось для монокристаллов, изготовленных из пластин с поперечной структурой зёрен (см. рис. 5). Для монокристаллов, изготовленных из прокатанных листов, такое крупномасштабное раскалывание не наблюдалось. Это свидетельствует о том, что стойкость вольфрамовых монокристаллов зависит от изначальной микроструктуры вольфрама.

Испытание импульсными нагрузками. Для моделирования условий тепловых нагрузок в срывах и ЭЛМах в ИТЭР используется методика испытания в импульсных плазменных установках в серии последовательных разрядов числом от одного до нескольких сотен и тысяч. Испытания проводят и в лазерных установках, а также при комбинированном воздействии квазистационарного плазменного разряда и одновременной нагрузки электронным пучком. При таких испытаниях вольфрама ожидается несколько эффектов разрушения и модификации поверхности, в том числе растрескивание, рекристаллизация и плавление поверхностного слоя.

При импульсных плазменных испытаниях вольфрамовых пластин в установке КСПУ-Т [20] зарегистрировано образование трещин на поверхности вольфрама при достаточно низких нагрузках в сравнении с порогом плавления. При испытании с плазменной нагрузкой до $0,5\text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}$ на поверхности формируются трещины, ширина трещин растёт с числом импульсов плазменной нагрузки, достигая 20 мкм при числе импульсов более ~ 500 . После испытаний таких мишеней впоследствии термоциклированием электронным пучком (2000 циклов с мощностью $10\text{ МВт}\cdot\text{м}^{-2}$ и 300 циклов с мощностью $20\text{ МВт}\cdot\text{м}^{-2}$) ширина таких трещин увеличивается до $50\text{--}200\text{ мкм}$ [20].

Регулярное образование трещин на поверхности вольфрама при испытаниях в КСПУ-Т начинается при тепловой нагрузке $0,8\text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}$, что ниже порога его плавления. Образуются трещины двух типов — крупные и мелкие, которые формируют регулярную сетку с характерным размером ячеек $1\text{--}2\text{ мм}$ и 200 мкм соответственно и характерным значением глубины проникновения в материал 500 и 50 мкм соответственно. Причём глубина крупных трещин существенно превышает максимальную толщину расплавленного слоя (рис. 6).

Пластины вольфрама ИТЭР под нагрузкой $1,6\text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}$, что соответствует нагрузке на материал первой стенки при срыве в ИТЭР, в экспериментах на КСПУ-Т после 100 импульсов оплавляются, поверхность значительно изменяется (рис. 7) [20].

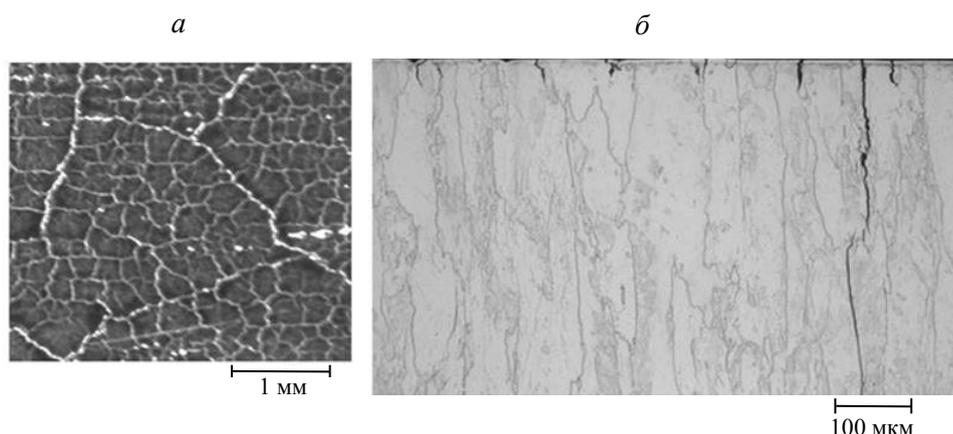


Рис. 6. Первичные (а) и вторичные трещины (б) вольфрама после испытаний в КСПУ-Т при нагрузке $1\text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}$, 100 импульсов

Рис. 7. Испытание вольфрама в КСПУ-Т при нагрузке $1,6\text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}$ (эквивалентно воздействию срыва в ИТЭР), 100 импульсов



Испытания вольфрамовых моноблоков сорта ITER-grade корпорации A.L.M.T. Corp. плазменным пучком в совокупности с электронным пучком (25 плазменных импульсов мощностью $\sim 2,0$ МДж·м⁻² и электронный пучок JEBIS с параметрами: 20 МВт·м⁻², длительность 10 с, 300 циклов [68]) также привели к образованию трещин в зоне оплавления поверхности вольфрама (рис. 8).

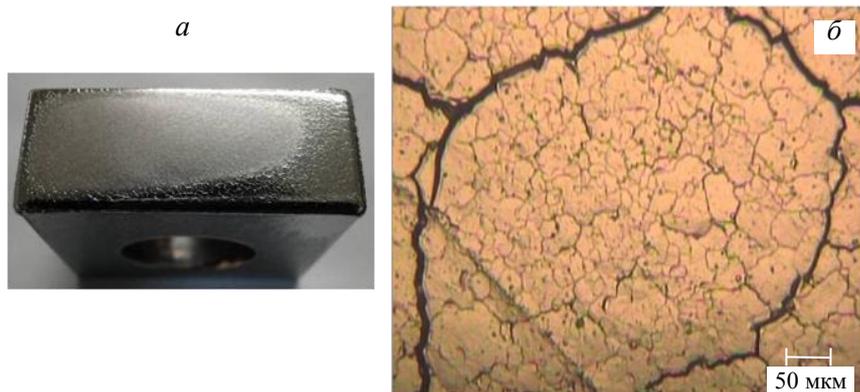


Рис. 8. Общий вид моноблока вольфрама ITER-grade W марки A.L.M.T. Corp. (а) и трещины в переплавленном слое — микрофотография СЭМ (б). Испытания плазменным пучком (25 импульсов) $\sim 2,0$ МДж·м⁻² и электронным пучком (установка JEBIS) 20 МВт·м⁻², 10 с, 300 циклов

Типичным результатом испытаний предельно мощными плазменно-тепловыми нагрузками при термоциклировании, когда ставится цель достичь предела разрушений моноблока, является раскалывание блока поперёк переплавленной зоны (рис. 9).



Рис. 9. Фотография моноблоков вольфрама ITER-grade марки A.L.M.T. Corp. после плазменно-тепловых испытаний в плазменной пушке и электронным пучком. На поверхности образуются большие трещины

Для моделирования воздействия срыва в ИТЭР требуются плазменные нагрузки ~ 2 МДж·м⁻² и выше. В настоящее время эти энергии достижимы при плазменных испытаниях в КСПУ-Т. В таких экспериментах на КСПУ-Т наблюдается оплавление поверхности, после её отверждения появляются мелкие трещины на поверхности вольфрама. Одновременно в глубине вольфрамовых образцов наблюдаются большие трещины вдоль поверхности (рис. 10). Такие трещины могут вызывать охрупчивание поверхности, разрушение поверхностных слоёв с образованием пылевых частиц различного размера. В поверхностных слоях формируются поперечные к поверхности трещины на глубину до 50 мкм (рис. 11).

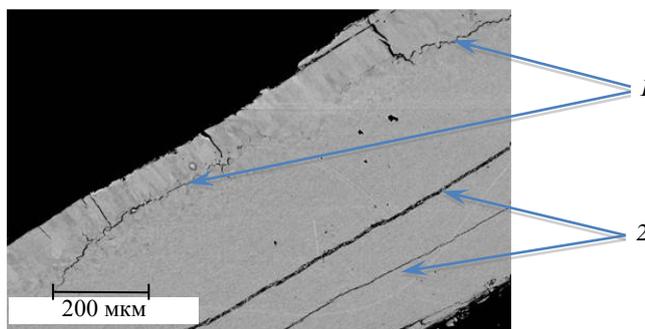


Рис. 10. Металлографический срез вольфрамовой мишени после испытаний в КСПУ-Т при нагрузках ($\Delta t = 0,5$ мс, 2 МДж·м⁻², $F_{HF} \approx 90$ МДж·м⁻²·с^{-0,5}, $N > 50$ импульсов), соответствующих срыву в ИТЭР: 1 — трещины вдоль поверхности после рекристаллизации поверхностного слоя; 2 — трещины в глубине, вызванные тепловым перегревом мишени и дефектами заготовки

В плазменной установке КСПУ-Х50 при испытаниях различных сортов вольфрама нагрузками, имитирующими ЭЛМы в ИТЭР [21], наблюдались крупные трещины (независимо от сорта

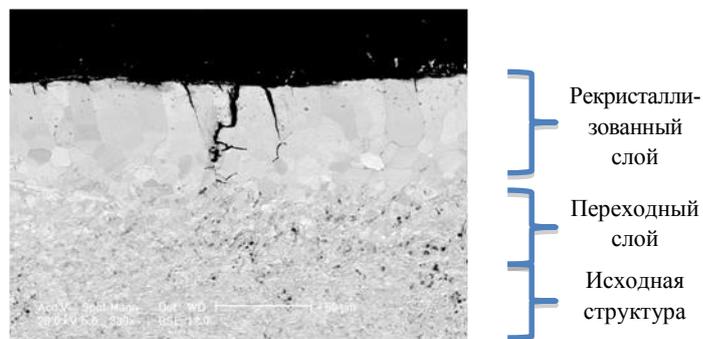


Рис. 11. Металлографический срез вольфрамовой мишени после испытаний в КСПУ-Т при нагрузках ($\Delta t = 0,5$ мс, 2 МДж·м⁻², $F_{HF} \approx 90$ МДж·м⁻²·с^{-0,5}, $N > 50$ импульсов), соответствующих срыву в ИТЭР

вольфрама — с прокаткой и другой изначальной структурой) и микротрещины, образующиеся, возможно, при отверждении оплавленных слоёв.

Эксперименты на JET. Плавление вольфрама в диверторе JET [32] наблюдалось на пластине, выступающей над поверхностью (рис. 12). При этом за несколько разрядов при плавлении вольфрама сформировались «бугорок» и «впадина» (рис. 13). Общий объём материала расплава составил 6—7 мм³. Расплав двигался поперек магнитного поля в сторону HFS сильного поля в соответствии с направлением силы Лоренца $\mathbf{J} \times \mathbf{V}$, связанной с током J из плазмы на поверхность. Это не соответствует ожидаемому в таких случаях разбрызгиванию расплавленного материала вдоль потока плазмы (ожидаемого газодинамического давления), т.е. вдоль магнитного поля. Этот экспериментальный результат представляется очень важным, поскольку демонстрирует значительный вклад токов из плазмы на стенку в токамаке. Требуется дополнительные экспериментальные исследования и теоретическое рассмотрение этого эффекта.

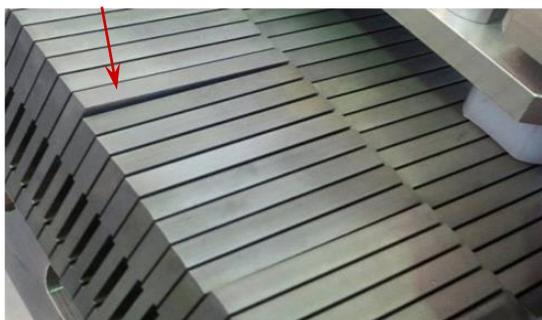


Рис. 12. Вольфрамовые пластины в JET ILW: → — выступающая над поверхностью тестовая пластина

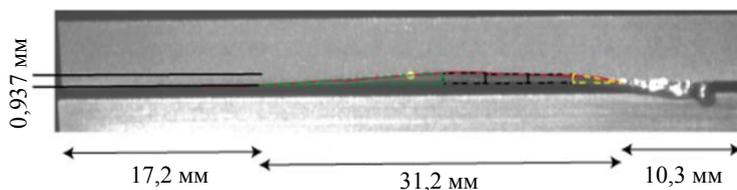


Рис. 13. Оплавление тестовой пластины W и изменение её формы с образованием капли в JET ILW

Эксперименты на ASDEX-U. Плавление вольфрама в ASDEX-U наблюдалось на тестовых пластинах (рис. 14, а) [33, 34]. Расплавленные капли вольфрама двигались под действием гравитации и силы $[\mathbf{j} \times \mathbf{V}]$, вызванной током \mathbf{j} термоэлектронной эмиссии расплавленного слоя. Исследователи не нашли ясных указаний на то, что давление плазменного потока преимущественно влияло на движение расплавленного вольфрама на больших масштабах [33]. Количество перераспределённого и унесённого с пластин материала в ASDEX-U было мало (225 и 315 мг). Авторы объясняют такое изменение эффектом разбрызгивания расплавленного вольфрама, в том числе вдоль потока плазмы.

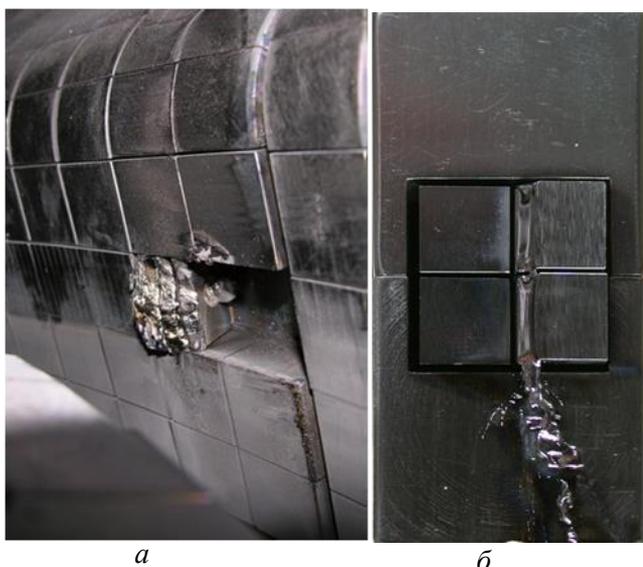


Рис. 14. Фотография вольфрамовых пластин после экспозиции в токамаке ASDEX-U (а), наблюдается разбрызгивание вольфрамовых капель с расплавленной поверхности; б — в токамаке C-Mod

Эксперименты на Alcator C-Mod. Тороидальное кольцо из вольфрамовых пластин было установлено на внешнем обводе дивертора C-Mod [33]. Эти пластины экспонировались в течение трёх экспериментальных кампаний, впоследствии были проведены исследования поверхности и структуры оплавленных зон [33, 75] (рис. 14, б). Расплавленные капли вольфрама, как и в токамаке ASDEX-U, двигались под действием гравитации и силы $[\mathbf{j} \times \mathbf{V}]$, вызванной термоэлектронной эмиссией. Также не найдено ясных указаний на то, что давление плазменного потока преимущественно влияло на движение (перемещение на большие масштабы) расплавленного вольфрама [33]. В течение трёх разрядов с параметрами плазмы, приводящими к плавлению вольфрама, на специальной тестовой пластине наблюдались потери около 15 г вольфрама.

Исследование капельной эрозии в КСПУ-Т. В экспериментах на токамаках наблюдались метал-

лические пылевые частицы различного размера ([48, 49, 76] и ссылки в них), которые рассматривались как капли расплавленного металла, унесённые с элементов первой стенки при критических плазменных нагрузках. Испытания материалов (металлов и углеграфитовых материалов) в других плазменных установках, в том числе плазменном ускорителе КСПУ ([19, 20, 69, 70, 77] и ссылки в них), показали значительный вклад эффекта эжекции капель с поверхности при расплавлении материала в совокупную эрозию поверхности материала при мощной плазменной нагрузке. Такой эффект называют капельной эрозией в отличие от эрозии в виде атомов, ионов, кластеров и др. Теоретическое рассмотрение процессов переноса расплавленного слоя металла при срывах плазмы в токамаках и при их моделировании в плазменных ускорителях типа КСПУ показало [78—80], что движение плазменного потока с давлением $P > 1$ атм. над расплавленным слоем металла является причиной быстрого движения расплава и капельной эрозии — эжекции капель с поверхности. В таком процессе давление плазменного потока над поверхностью сжимает волну расплавленного металла на поверхности и вынуждает её двигаться со скоростью до ~ 10 м/с (значительно превышающей скорость движения, вызванного иными механизмами, например, тепловым движением и др.). Капиллярные волны на валах инициируют выброс капель размером порядка длины волны 30—60 мкм. Возможен также выброс мелких капель ~ 1 мкм, обусловленный сдуванием вершущек волн плазменным ветром. Такие теоретические рассмотрения соответствуют наблюдениям в экспериментах на плазменных ускорителях.

Капельная эрозия при плавлении вольфрама исследовалась в КСПУ-Т в 2007—2010 гг. [20]. При такой эрозии поверхность модифицируется, формируются переплавленные слои, на поверхности наблюдаются застывшие капли после переосаждения (рис. 15) [69, 70].

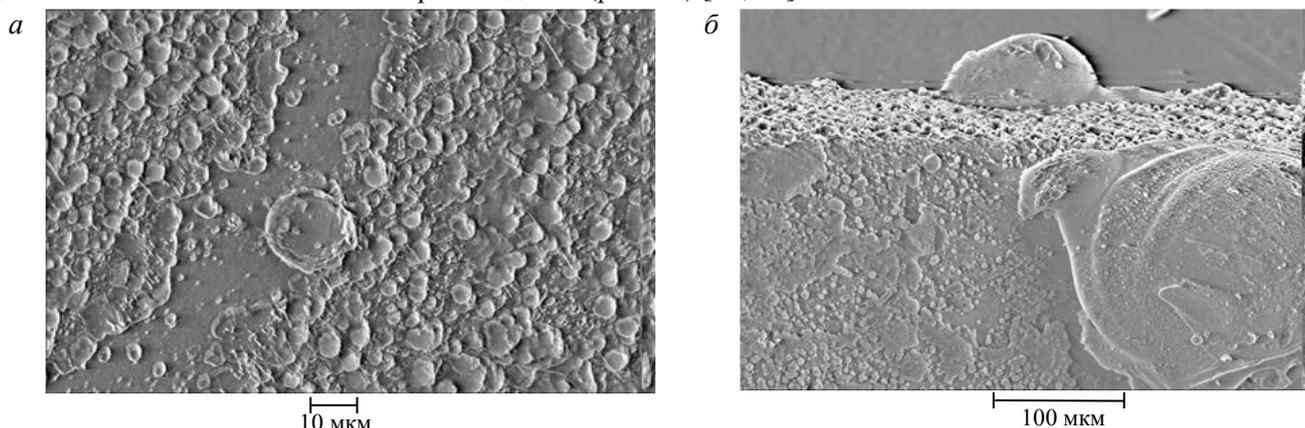


Рис. 15. Микрофотографии СЭМ вольфрама после испытаний в КСПУ-Т: *а* — плавление поверхности; *б* — капельная эрозия, на поверхности наблюдаются застывшие капли

С капельной эрозией связана проблема формирования пылевых частиц в плазменных установках [78]. В токамаках эффект капельной эрозии экспериментально не изучался.

Переосаждение вольфрама зарегистрировано в экспериментах на КСПУ [19]. В этих работах предполагалось, что вольфрам может переосаждаться при капельной эрозии в виде вольфрамовых капель на поверхности, близкие к зоне расплава. Наблюдение поверхности мишеней с типичным рельефом с макроскопическими каплями свидетельствует о вкладе капельной эрозии в процесс переосаждения вольфрама. Микроскопическое исследование показало неоднородную структуру переосаждённых слоёв [5, 7]. Требуется дополнительные исследования процессов переосаждения вольфрама для предсказания состояния вольфрамовой облицовки дивертора ИТЭР.

В заключение этого раздела следует отметить, что некоторые важные процессы, которые могут приводить к разрушению вольфрамовых пластин дивертора в ИТЭР, не исследовались в экспериментах. Это относится в том числе к проблеме униполярных дуг в токамаке [81, 82], их воздействие на вольфрамовую поверхность в токамаках экспериментально систематически не изучалось. Приоритетность дополнительных исследований всех процессов при испытаниях вольфрама следует определять, исходя из современных экспериментальных данных и рассмотрения физики взаимодействия плазма—стенка в токамаке как сложного процесса, включающего совокупность и всех важных эффектов, которые при одновременном воздействии могут приводить к новым процессам модификации, эрозии и разрушения поверхности вольфрама.

ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ПОСЛЕ ОТВЕРЖДЕНИЯ РАСПЛАВЛЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ И РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ ВОЛЬФРАМА

При критических тепловых нагрузках в ИТЭР при срывах ожидается эффект плавления поверхности вольфрамовой облицовки (температура плавления вольфрама $T_{пл} = 3370$ °С). После отверждения расплавленного слоя структура вольфрама изменяется по сравнению с начальной, что приводит к изменению механической прочности поверхности, могут формироваться трещины на поверхности и внутри образцов. При воздействии ЭЛМов в ИТЭР ожидается подъём температуры вольфрамовой облицовки до уровня выше температуры рекристаллизации. С повышением температуры металла (в том числе вольфрама, см. [10]) происходят рекристаллизация — укрупнение зёрен, с увеличением времени критического теплового воздействия зёрна также укрупняются. В металлофизике известно правило А.А. Бочвара, которое связывает температуру начала (порога) рекристаллизации $T_{рек}$ металлов и сплавов с температурой плавления $T_{пл}$, для вольфрама $T_{рек} \cong 0,4T_{пл}$. В металлургии известна минимальная температура рекристаллизации вольфрама $T_{рек} \cong 1200$ °С. Процесс рекристаллизации зависит от многих условий. При рекристаллизации происходят деградация механических свойств, охрупчивание, уменьшается жаропрочность. Испытания вольфрамовых образцов и исследование структуры нагрузками, ожидаемыми в ИТЭР, проводятся с учётом данных о поведении вольфрама при нагреве, известных в металлургии.

Мишени вольфрама российской марки ВМ-П (ОАО «ПОЛЕМА», англ. POLEMA, этот сорт вольфрама предполагается использовать для изготовления диверторных пластин ИТЭР) исследованы после испытаний в плазменном ускорителе КСПУ-Т [5] с плотностью энергии, соответствующей ожидаемой в ИТЭР при плазменной фазе срыва.

Мишени экспонировались в серии последовательных импульсов длительностью 0,5 мс при тепловом потоке $q \approx 2$ МДж·м⁻², что превышало порог плавления вольфрама. После отверждения расплавленного слоя в этом слое наблюдались крупномасштабные колоннообразные кристаллиты. Толщина рекристаллизованного слоя на поверхности мишени достигала ~40—50 мкм. Текстура рекристаллизованного слоя существенно отличается от исходной. Рекристаллизованный слой так же, как и исходная структура, имеет текстуру с ориентацией <100> перпендикулярно поверхности, но размеры зёрен в рекристаллизованном слое значительно больше. Наблюдался переходный слой с хаотической ориентацией зёрен, глубина этого слоя порядка глубины рекристаллизованного слоя.

Размер гранул (зёрен):

- в рекристаллизованном слое до ~10×50 мкм;
- в переходном слое — случайная ориентация кристаллитов (не имеют вытянутости) размером ~3—5 мкм;
- в исходной структуре ~1 мкм.

Воздействие мощных импульсных процессов может быть причиной образования трещин на поверхности и вызывать охрупчивание вольфрама. Хрупкое разрушение рекристаллизованного слоя может приводить к формированию пылевых частиц субмикронного размера, что ухудшит производительность установки. Крупномасштабные трещины вдоль поверхности расположены на глубине, превышающей ~300 мкм (см. рис. 10, 11). Наблюдалась нормальная к поверхности трещины, простирающиеся от поверхности до глубины рекристаллизованного слоя, и параллельные поверхности трещины на глубине до 300 мкм. Такие трещины могут вызвать хрупкое разрушение и быть опасны для вольфрамового дивертора ИТЭР. В работе [7] проведён анализ таких экспериментальных наблюдений и даётся теоретический анализ причин образования трещин и возможных последствий срывов в ИТЭР.

Хрупкое разрушение из-за трещин в переотверждённом (рекристаллизованном) слое может формировать пылевые частицы субмикронного размера [7]. Условия термоядерной плазмы требуют низкой концентрации вольфрама в центральной зоне разряда ($<(1—3)10^5$) [34]. Таким образом, хрупкое разрушение рекристаллизованных слоёв относится к критическим вопросам загрязнения плазмы мелкомасштабными пылевыми частицами вольфрама.

Глубокие крупномасштабные трещины могут быть вызваны первоначальными дислокациями из-за метода производства вольфрама промышленной прокаткой, что подтверждается соответствующими ис-

пытаниями вольфрама с различной исходной структурой — прокатанный вдоль поверхности и с поперечной структурой зёрен.

Наклонные границы гранул в слое рекристаллизации (рис. 16) могут приводить к повышенной вероятности охрупчивания. В рекристаллизованном слое наблюдаются колоннообразные гранулы, вытянутые перпендикулярно поверхности (рис. 17) независимо от исходной структуры вольфрама — прокатанного или с поперечной структурой кристаллитов. Гранулы идентичного размера в рекристаллизованном слое формируются независимо от исходной текстуры.

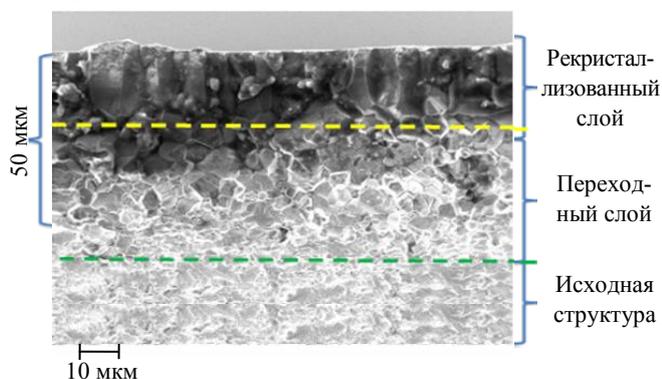


Рис. 16. Металлографический срез мишени вольфрама после испытаний в КСПУ-Т ($\Delta t = 0,5$ мс, $2 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}$, $F_{\text{HF}} \approx 90 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-0,5}$, $N = 2$ импульса)

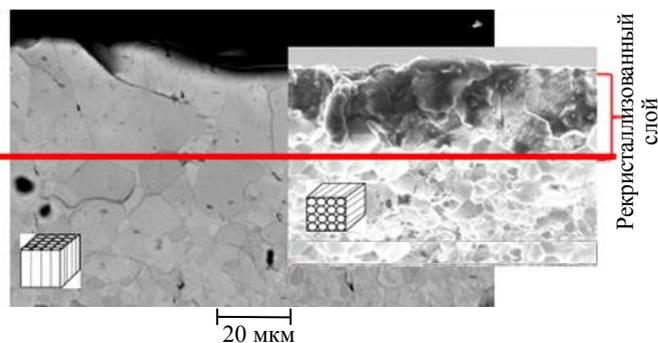


Рис. 17. Металлографический срез мишеней вольфрама с различной ориентацией зёрен (перпендикулярно и параллельно поверхности — отмечены схематичными указателями) после испытаний в КСПУ-Т, $\Delta t = 0,5$ мс, $2 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}$, $F_{\text{HF}} \approx 90 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-0,5}$, $N = 2$ импульса

Исследование влияния примесей на рекристаллизацию (примесь бора на поверхности вольфрамовой мишени) показало, что после оплавления при мощной плазменной нагрузке в КСПУ-Т рекристаллизованный слой на такой поверхности не имеет качественных отличий от рекристаллизованного слоя образца чистого вольфрама без примесей.

Исследования структуры вольфрамовой мишени после испытаний электронным пучком (в установке JUDITH-2, Германия) (рис. 18, 19) и нейтральными мощными потоками (в установке GLADIS, Германия) показали такие же результаты: формирование рекристаллизованного слоя с колоннообразными гранулами, ориентированными перпендикулярно поверхности [74].

Рис. 18. Металлографический срез мишени вольфрама после испытаний электронным пучком в JUDITH-2 после $N = 18\ 000$ импульсов, эффективный фактор теплового потока $F_{\text{HF}} \approx 4,5 \text{ МВт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-0,5}$, образуется рекристаллизованный слой на глубине до 2 мм

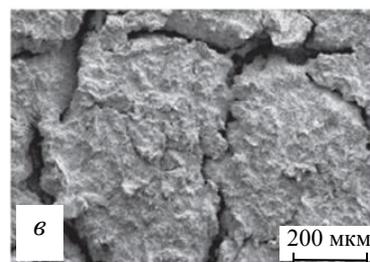
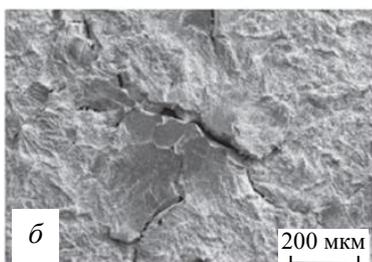
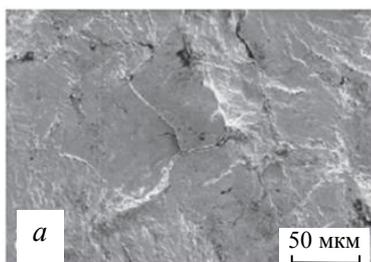
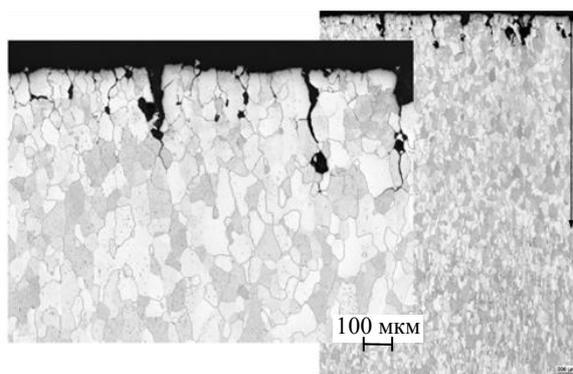


Рис. 19. СЭМ-изображение поверхности вольфрамового образца после испытаний электронным пучком в установке JUDITH-2, $0,41 \text{ ГВт}\cdot\text{м}^{-2}$ (что соответствует фактору теплового потока $F_{\text{HF}} \approx 9 \text{ МВт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-0,5}$ и плотности энергии $0,2 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}$) после 1000 (а), 10 000 (б), 100 000 (в) импульсов, квазистационарная температура образца $700 \text{ }^\circ\text{C}$ [30]

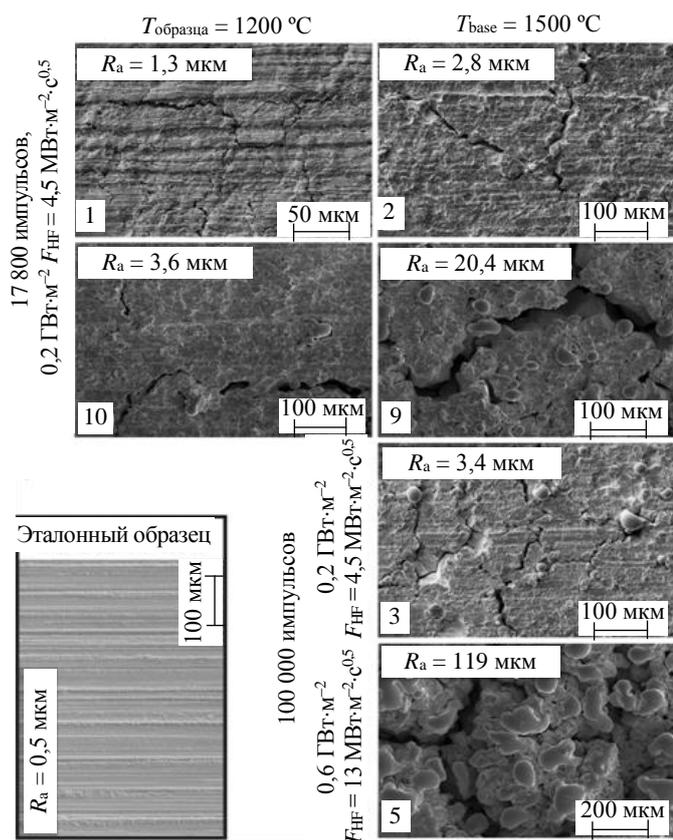


Рис. 20. СЭМ-изображения поверхности вольфрамового образца после испытаний в установке JUDITH-2: для 17 800 и 100 000 импульсов с различной тепловой нагрузкой: R_a — значение шероховатости, измеренной как среднеквадратичное отклонение высоты профиля относительно среднего уровня [28]

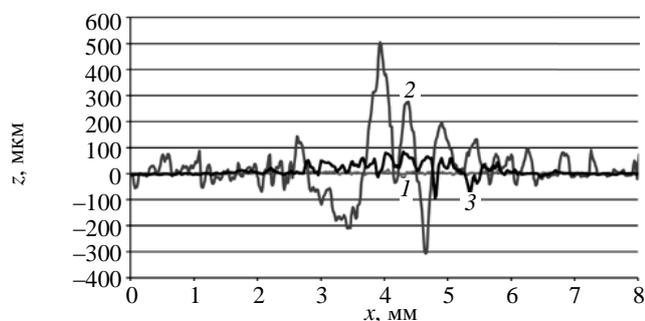


Рис. 21. Профили шероховатой поверхности после испытаний вольфрама электронным пучком в установке JUDITH-2: 1 — эксперимент 3, 100 000 импульсов с плотностью энергии 0,1 МДж·м⁻², фактор теплового потока $F_{HF} \approx 4,5 \text{ МВт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-0,5}$; 2 — эксперимент 5, 100 000 импульсов с плотностью энергии 0,3 МДж·м⁻², фактор теплового потока $F_{HF} \approx 13 \text{ МВт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-0,5}$; 3 — эксперимент 9, 17 800 импульсов с плотностью энергии 0,1 МДж·м⁻², фактор теплового потока $F_{HF} \approx 4,5 \text{ МВт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-0,5}$ с предварительным облучением мощными нейтральными пучками в течение 2500 с (температура образца 1500 °С)

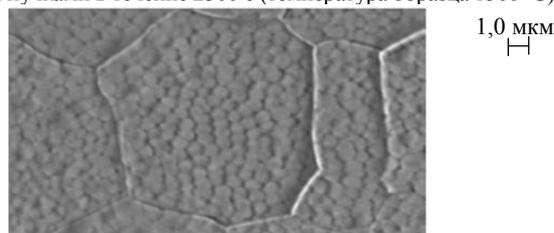


Рис. 22. Микрофотография СЭМ поверхности мишени вольфрама после испытаний в КСПУ-Т, $\Delta t = 0,5 \text{ мс}$, $2 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$, $F_{HF} \approx 90 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-0,5}$, $N = 2$ импульса

В установке JUDITH-2 электронный пучок имеет гауссово распределение в пространстве с шириной (при половине максимума интенсивности) несколько миллиметров. Пучок перемещается по поверхности образца при испытаниях и обеспечивает импульсную нагрузку длительностью 0,48 мс с частотой повторения 10 Гц, параметрами тепловой нагрузки: плотность мощности 0,2 ГВт·м⁻² (что соответствует фактору теплового потока $F_{HF} \approx 4,5 \text{ МВт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-0,5}$ и плотности энергии 0,1 МДж·м⁻²) или 0,6 ГВт·м⁻² (что соответствует фактору теплового потока $F_{HF} \approx 13 \text{ МВт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-0,5}$ и плотности энергии 0,3 МДж·м⁻²) (рис. 20) [28]. Некоторые образцы (см. рис. 20, образцы 9, 10) подвергались облучению мощными нейтральными водородными пучками в установке GLADIS мощностью 14 МВт·м⁻², поток частиц $1,2 \cdot 10^{25}$ частиц·м⁻², время облучения 2500 с, при этом температура образца повышалась до 1500 °С без видимых разрушений образца. В дальнейшем эти образцы испытывались электронными пучками в JUDITH-2.

Большое количество импульсов нагрузки в установке JUDITH-2 электронным пучком формирует значительные изменения поверхности со стохастическим рельефом [71] (см. рис. 19). После 100 000 импульсов нагрузки уровня ЭЛМов в ИТЭР такая морфология наблюдалась с модуляцией шероховатости на глубину до ~500 мкм (рис. 21), что является очень большой величиной (например, во много раз больше лармеровского радиуса ионов в периферии разряда).

Отмечается, что после предварительной обработки образцов повышенными тепловыми нагрузками, приводящими к рекристаллизации поверхности (см. рис. 20, 21), наблюдается повышенный уровень шероховатости.

Шероховатая поверхность с изменённой микроструктурой, наблюдаемая при испытаниях вольфрама повышенными плазменно-тепловыми нагрузками, является потенциальным источником пылевых частиц различных масштабов.

Значительное изменение шероховатости и гранулярности поверхности вольфрамовых мишеней наблюдалось также и при плазменных испытаниях в КСПУ-Т при нагрузке

2 МДж·м⁻², соответствующей срыву в ИТЭР, даже после нескольких импульсов. Наблюдается гранулярность вольфрамовых мишеней в поверхностном слое — гранулы размером 0,5—1 мкм (рис. 22).

Влияние микроструктуры на рекристаллизацию вольфрама с различной микроструктурой исследовалось в экспериментах на плазмотроне [83].

Исследование порога образования трещин и их свойств проведено при испытаниях вольфрама ИТЭР мощным облучением Nd:YAG-лазером ($\lambda = 1064$ нм) с энергией в импульсе до 32 Дж в течение 1 мс в серии последовательных импульсов (моделирование нагрузки ЭЛМов в ИТЭР) [84]. Порог разрушения ИТЭРовского вольфрама в этих экспериментах был в диапазоне от 0,38 до 0,76 ГВт·м⁻². Наблюдалось значительное изменение морфологии поверхности с увеличением числа лазерных импульсов (от 100 до 1000) (рис. 23). После 1000 лазерных импульсов на вольфрамовом образце при температуре ~300 К наблюдалась повышенная эрозия из-за разрушения и плавления образованных трещин (см. рис. 23). При увеличении температуры образца до 700 К в таких же экспериментах формировалась шероховатая поверхность без трещин (рис. 24).

В лазерных экспериментах в работе [85] уровень нагрузки ЭЛМов в ИТЭР имитировался импульсами 0,5 мс с плотностью энергии до 0,5 МДж·м⁻². При плотности энергии 0,2—0,3 МДж·м⁻² наблюдалось образование трещин на поверхности вольфрама. При энергии более 0,5 МДж·м⁻² наблюдалось плавление поверхности вольфрама, с числом импульсов энергия, требуемая для оплавления поверхности, уменьшалась.

Комбинированное воздействие плазменной нагрузки в установке Magnum-PSI и лазерного облучения (Nd:YAG-лазер) на вольфрамовые мишени с целью имитации ЭЛМов исследовалось в работе [86]. В этих экспериментах наблюдались рост зёрен на поверхности и формирование шероховатой структуры вольфрамовых мишеней.

В заключение этого раздела следует отметить один из важных результатов экспериментальных исследований поведения вольфрама при мощных тепловых нагрузках, полученный за несколько последних лет: несмотря на различие глубины проникновения в поверхность частиц в различных установках, используемых для формирования тепловой нагрузки (стационарных плазменных установках, плазменных ускорителях, установках с электронными и ионными пучками, лазерных установках, плазмотронах), в литературе сообщается о подобии эффектов трещинообразования, рекристаллизации, разрушения вольфрамовых тестовых образцов в разных установках, наблюдаются похожие поведение и порог разрушения поверхности вольфрама при различных типах тепловой нагрузки [4, 65, 84]. Для выявления всех свойств такого эффекта следует провести дополнительное исследование микроструктуры вольфрама после испытаний при комбинированном воздействии в различных установках (в том числе и в токамаке) и условиях испытаний, близких к условиям ЭЛМов и срывов в ИТЭР и ДЕМО [87].

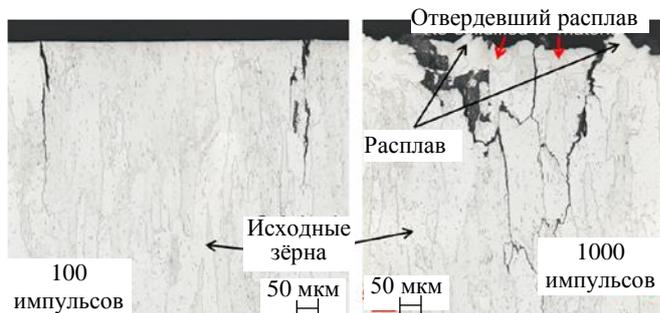


Рис. 23. Изменение поверхности вольфрама после серии испытаний мощными лазерными импульсами 0,76 ГВт·м⁻² длительностью 1 мс: 100 и 1000 импульсов. Температура вольфрамовых образцов ~300 К

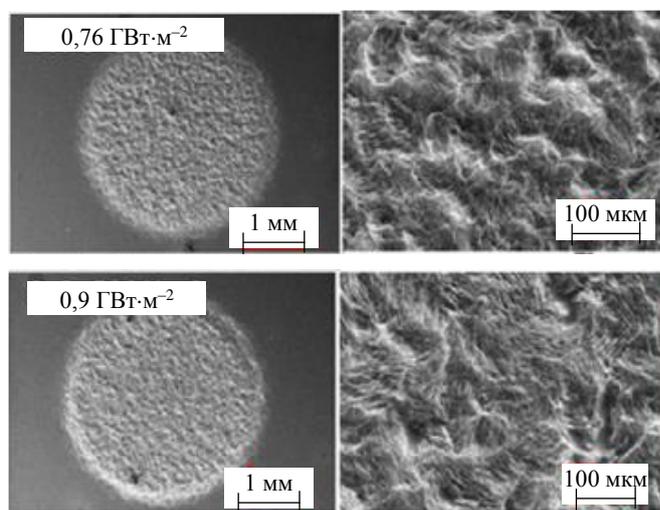


Рис. 24. Изменение поверхности вольфрама после серии испытаний мощными лазерными импульсами 0,76 ГВт·м⁻² и 0,9 ГВт·м⁻², 1000 импульсов, длительность импульса 1 мс. Температура вольфрамовых образцов ~700 К

ЗАХВАТ ТРИТИЯ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ

В ИТЭР при длительности разряда 400 с при $Q_{DT} = 10$ требуется напуск ~ 100 г трития. Максимальное количество трития, допустимое по радиологическим нормам в ИТЭР, ограничено массой 1 кг [88], из них предел в камере ~ 700 г, 120 г в крионасосах и 180 г в других зонах. Тритий может захватываться в поверхностных слоях, трещинах, перенапылённых плёнках и слоях на поверхности материалов, обращённых к плазме. Оценки захваченного трития в камере ИТЭР основываются на подходах, рассматривающих структуру как исходной, так и подверженной плазменному воздействию поверхности материалов.

Проведённые к настоящему времени оценки захваченного трития в вольфрамовом диверторе рассматривали, в основном, только механизм имплантации атомов в кристаллическую поверхность (предполагая, что вольфрамовая поверхность либо кристаллическая, либо кристаллическая с наличием трещин, с отсутствием значительной шероховатости), что не является большим резервуаром для накопления трития.

На графиках рис. 25, 26 показаны диаграммы, построенные на основе современных представлений оценки захвата трития в первой стенке ИТЭР, изготовленной из разных материалов.

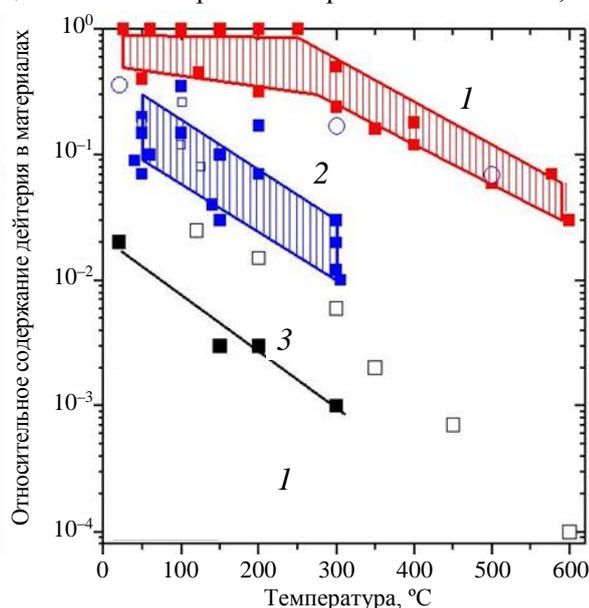


Рис. 25. Температурная зависимость количества дейтерия, захваченного в различных материалах [89]: C (■1); Be (■2); W (■3); BeC (□); BeO (○); WC (□)

В экспериментах на ASDEX Upgrade наблюдалось уменьшение в 5—10 раз поглощения рабочего газа (дейтерия) при работе с вольфрамовой стенкой в сравнении с углеродной стенкой [89, 90] (рис. 27).

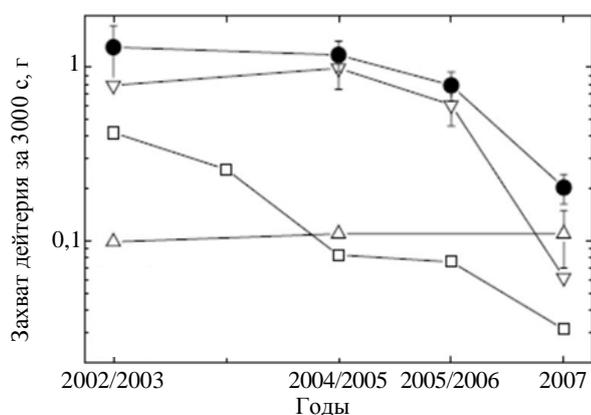


Рис. 27. Захват D в диверторе и периферийных зонах ASDEX Upgrade в период работы токамака с 2002/2003 до 2007 г.: ∇ — внутренняя пластина дивертора; \triangle — внешняя пластина дивертора; \square — удалённые зоны; \bullet — общий объём

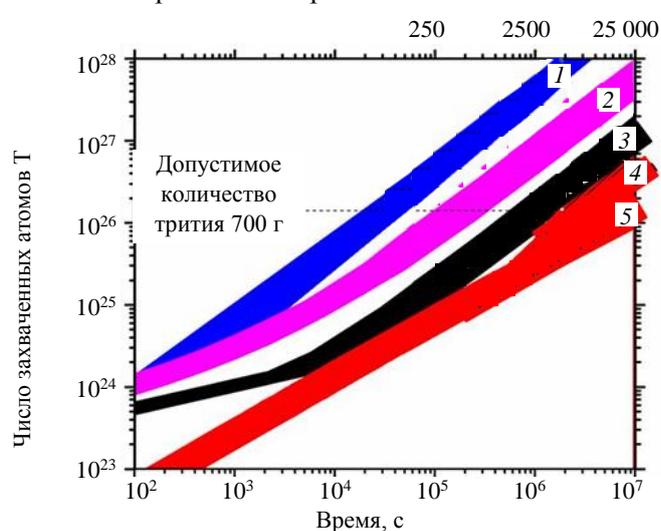


Рис. 26. Оценка количества трития, аккумулированного в материалах ИТЭР, обращённых к плазме, в зависимости от числа разрядов длительностью 400 с: только углерод (1); CFC + W + Be (2); В-первая стенка + W-дивертор (3); только вольфрам с учётом нейтронной радиации (4); только вольфрам без учёта нейтронной радиации (5)

В экспериментах с вольфрамовым дивертором наблюдали пониженную аккумуляцию рабочего газа в вольфрамовых поверхностях в сравнении с захватом рабочего газа в переосаждённых бериллиевых слоях [90, 91].

Вопросы захвата трития в поверхностных слоях первой стенки ИТЭР рассматривались в работах [91—99].

Принимая во внимание возможность формирования неоднородных, разрушенных и пористых поверхностных слоёв на диверторных пластинах, следует внести соответствующие коррективы в оценки аккумуляции трития в ИТЭР [93, 100].

ВОЛЬФРАМОВАЯ ПЫЛЬ

В экспериментах на токамаках и других термоядерных установках проблеме образования пылевых частиц уделяется значительное внимание в течение последних десятилетий ([49, 76] и ссылки в них). В начальный период основные работы были посвящены сбору и эмпирическому описанию крупноразмерной фракции пыли (с размером пылевых частиц более ~ 20 — 50 мкм) в камерах токамаков после длительных экспериментальных кампаний. В тот период при анализе продуктов эрозии большая часть пыли рассматривалась как результат механического разрушения поверхности внутрикамерных элементов и возможного оплавления материальных поверхностей, большее внимание уделялось крупноразмерным частицам.

Однако в последнее десятилетие в токамаках и других термоядерных установках была обнаружена фракция пыли с размером частиц ~ 1 — 20 мкм и даже нанометрового размера. Число и совокупная масса таких частиц оказались значительными. Общее количество микро- и наноразмерных частиц в эксперименте на токамаке зарегистрировать сложно, так как эти частицы химически активны, после окончания разряда они захватываются на материальных поверхностях, и требуется специальная техника для их регистрации. Такие работы начаты с недавнего времени в нескольких лабораториях [101].

Факт обнаружения микро- и наноразмерных пылевых частиц в токамаках имеет важное значение, поскольку такие частицы могут из периферийной плазмы глубоко проникать в центральные зоны разряда и приводить к радиационному охлаждению плазмы. Поэтому представляется важным оценить количество таких частиц в ИТЭР, выявить механизмы их образования. Следует отметить, что количество наноразмерных частиц не описывается простейшим механизмом механического разрушения твёрдого тела с кристаллической структурой, так как зарегистрировано число малоразмерных частиц значительно больше крупноразмерных.

При работе с графитовыми внутрикамерными элементами (лимитерами, диверторными пластинами) регистрировали большое количество пылевых частиц нерегулярной формы [40, 76]. Такую форму вначале связывали с особенностью химических свойств углерода и его способностью формировать агрегаты и кластеры различной формы и различных размеров. Было опубликовано большое количество работ о таких наблюдениях в токамаках (T-10, JET, TEXTOR, AUG, DIII-D и др.) и других термоядерных установках [49]. Например, в токамаке Глобус-М зарегистрированы углеродная пыль с размером частиц от 1 до 100 мкм и металлическая пыль с размером частиц от 10 до 1000 мкм [102].

Однако при плазменных испытаниях вольфрама в последние годы было обнаружено большое количество микроразмерной пыли нерегулярной формы аналогично наблюдениям при испытаниях графитовых и других материалов, что ставит вопрос изучения всех механизмов образования пыли в токамаке. В литературе, кроме механизма механического разрушения материала и разрушения материала под действием мощных нагрузок при воздействии ЭЛМов, срывов и др., обсуждаются универсальные механизмы формирования пылевых частиц нерегулярной формы. Пыль — это не только результат механического охрупчивания поверхности материала, но иногда в большей мере это результат капельной эрозии и агломерации кластеров из ионов, атомов и молекул на поверхности и в объёме. Предложены теоретические рассуждения механизмов образования наноразмерной пыли в токамаке ([49, 78, 79] и ссылки в них). Далее мы приведём описание экспериментальных наблюдений, которые могут быть аргументом в пользу рассмотрения таких универсальных механизмов.

В ИТЭР пыль будет радиологически опасна, бериллиевая пыль токсична. Пыль также химически активна при взаимодействии с водяным паром. Размер пылевых частиц может быть от нанометров до ~ 100 мкм. Требования, выдвигаемые для ИТЭР:

- предел в ИТЭР — 1000 т всей пыли и 18 кг пыли на горячих поверхностях;
- предел H_2 выхода с горячей поверхности 2,5 кг, что соответствует 9 кг Be + 9 кг W.

В ИТЭР ожидается, что большое количество пылевых частиц может переосаждаться на диверторных пластинах и образовывать стойкие агломераты, композитные слои и плёнки в химическом соединении и сплавах с бериллием и другими элементами, приводя к изменениям свойств поверхности. Эти вопросы не исследованы. Проблему стойкости и свойств поверхности вольфрамовых пластин дивертора в ИТЭР следует рассматривать в совокупности с проблемой образования пылевых частиц. Поэтому совместное рассмотрение и анализ имеющихся экспериментальных результатов испытаний вольфрама и

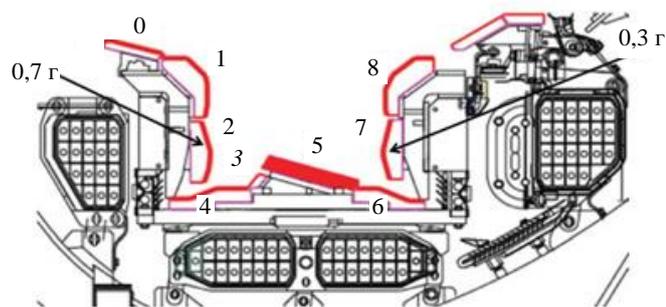


Рис. 28. Пыль, собранная на диверторных пластинах в экспериментах с Ве/W-стенкой ILW в JET. Указаны зоны осаждения (0—8) и количество пыли в диверторе: на внутреннем обводе 0,7 г, на внешнем обводе 0,3 г

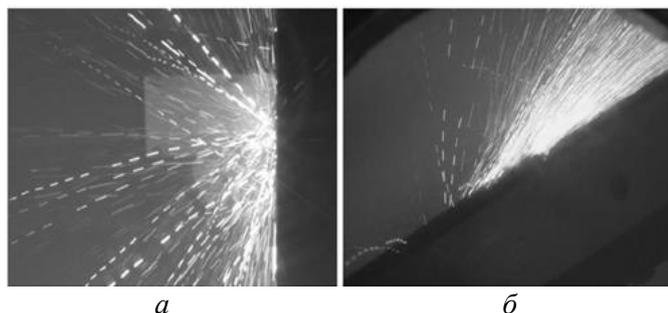


Рис. 29. Изображение треков капель вольфрама при нормальном (а) и наклонном (б) падении плазменного пучка в КСПУ-Т на мишень [19]

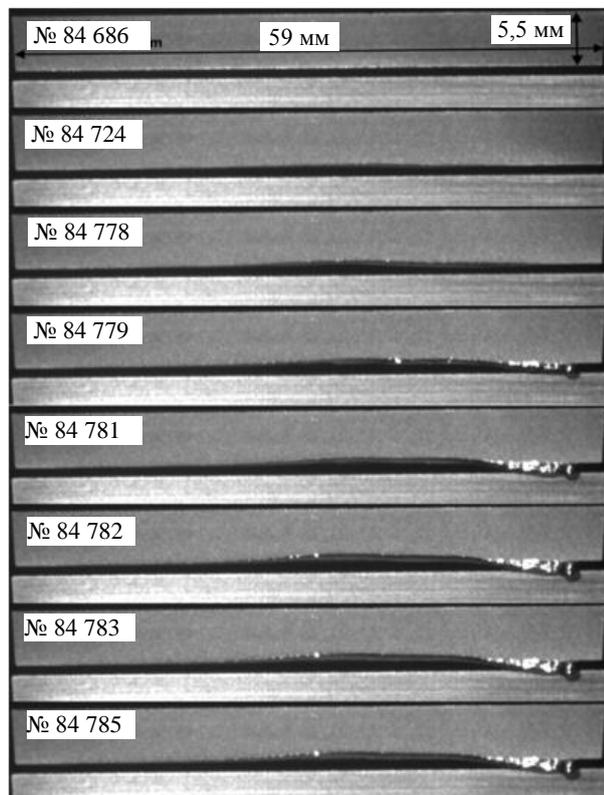


Рис. 30. Расплавление и образование капли на поверхности тестовой вольфрамовой пластины в диверторе JET (снимки после последовательных разрядов)

пылевых частиц в токамаке рассматривался по аналогии с процессом обычного механического разрушения твёрдых тел с регулярной кристаллической структурой. В такой модели функция распределения частиц по размерам — гауссиан с незначительным числом частиц малого размера $<1-10$ мкм.

наблюдения пылевых частиц представляются важными для оценки как стойкости вольфрамовых диверторных пластин, так и для предсказания свойств периферийной и центральной плазмы ИТЭР в условиях поступления вольфрамовых микро- и наноразмерных частиц в плазму.

Пыль в JET-ILW. После экспериментальной кампании JET с материалами Ве/W (2011—2012 гг.) [103, 104] собрано около ~ 1 г пыли, на внутренней пластине количество пыли было больше (рис. 28).

Для сравнения — за период 2007—2009 гг. (при работе с графитовой стенкой) собрано 180 г углеродной пыли. Но отмечается, что с графитовой стенкой было около 33 ч экспозиции графита в X-точке, а в экспериментах с Ве/W-стенкой только 12 ч [103].

Капельная эрозия вольфрама при мощных плазменных нагрузках исследовалась в КСПУ-Т [20, 69, 70] (рис. 29).

Как показано в экспериментах на КСПУ-Т, при воздействии мощных плазменных нагрузок уровня срыва в ИТЭР вольфрам плавится и часть расплавленного материала сметается с мишени плазменным потоком в виде капель — происходит так называемая капельная эрозия. Размер этих капель несколько десятков микрометров. Теоретическое рассмотрение капельной эрозии предложено в работах [35, 105], эти вопросы обсуждаются и другими авторами.

В JET наблюдалась эволюция расплавления и образования капли на поверхности тестовой вольфрамовой пластины дивертора в последовательных разрядах (рис. 30). В JET измерения излучения в пристеночной плазме позволили оценить размер вольфрамовых капель, поступающих в плазму с расплавленной поверхности вольфрамовой пластины. Такие оценки определили размер и массу капли — 60 мкм и 41 мкг соответственно. В стеллараторе LHD при исследовании пыли и капель [101] зарегистрированы размеры углеродной пыли менее 1 мкм, которые являются агломератами с нерегулярной формой, образованной мелкими частицами размером ~ 10 нм, наблюдался степенной закон распределения пыли по размерам.

Образование пыли из переосаждённых слоёв. В работах 1990—2000 гг. предсказывались экспоненциальные законы распределения пылевых частиц с максимумом в зоне нескольких десятков микрометров. При этом процесс образования пы-

Однако наблюдения размеров пыли в плазменных экспериментах [49] не соответствуют таким традиционным моделям, рассматривающим простейшее механическое разрушение твёрдого тела с регулярной кристаллической структурой. Экспериментальная функция распределения качественно отличается от гауссиана. В плазменных экспериментах формируется очень большое количество пылевых частиц микронного и нанометрового размера и функция распределения частиц по размерам описывается не экспоненциальными, а степенными законами. Физические процессы, приводящие к формированию пыли в плазменных установках, рассмотрены в работах [48, 49], где рассматриваются процессы роста переосаждённых слоёв нерегулярной формы (фрактальный рост) при взаимодействии плазмы с материальной стенкой в термоядерных установках.

Рекристаллизованный или переплавленный слой вольфрама, образующийся после мощной плазменной нагрузки срывов и ЭЛМов в ИТЭР, может быть источником пыли с размером пылевых частиц от ~100 нм до ~10 мкм и капель размером >10 мкм. При испытании вольфрама в КСПУ-Т плазменными нагрузками до 1 МДж·м⁻² пылевые частицы регистрировались на тест-пластинах (рис. 31). Распределение пылевых частиц по размерам имеет степенную зависимость с законом $N \sim r^{-a}$, $a = 2,2 \pm 0,1$. Такое степенное распределение пылевых частиц наблюдалось также в стеллараторе LHD и токамаке T-10 для углеродной пыли, которая формируется при эксплуатации графитового лимитера в плазменных разрядах. Рассматривается универсальный механизм образования пыли в условиях переосаждённых слоёв [48, 49]. Таким образом, ожидаемое распределение пыли по размерам в ИТЭР может описываться не гауссовым, а степенным законом, что обуславливает большое количество пылевых частиц микро- и нанометрового размера.

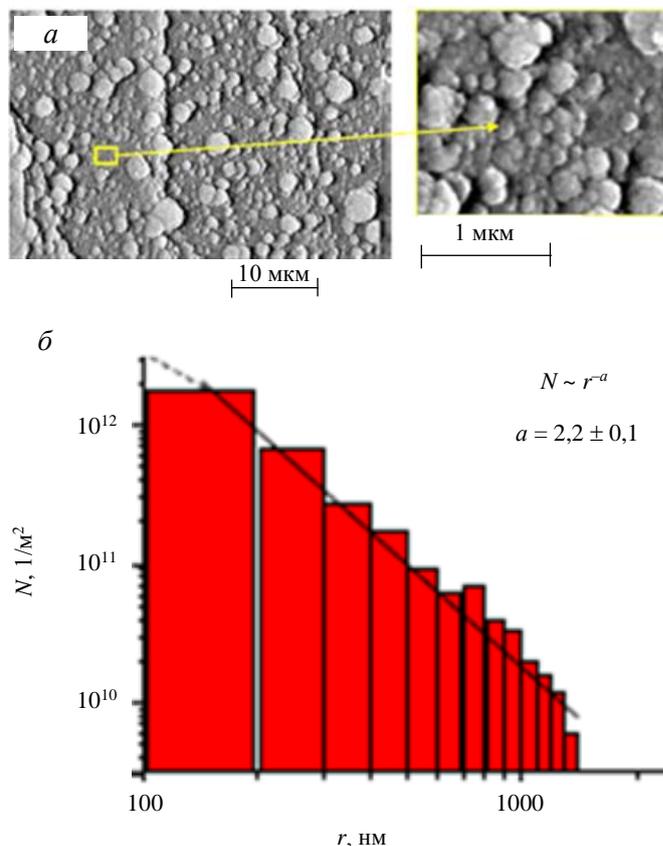


Рис. 31. СЭМ-изображение вольфрамовой пыли, полученной после испытаний вольфрамовых мишеней в КСПУ-Т плазменными нагрузками до 1 МДж·м⁻² (а), и распределение числа пылевых частиц (б). Наблюдается степенная зависимость распределения от размера пылевых частиц

ФОРМИРОВАНИЕ ПОРИСТЫХ СЛОЁВ В He-ПЛАЗМЕ

Под воздействием гелиевой плазмы в экспериментах на линейных плазменных установках NAGDIS-II, PISCES и др. был обнаружен эффект роста на вольфрамовой поверхности пористых слоёв (так называемый fuzz) [100, 106—114]. Степень пористости и глубина слоя зависят от интенсивности потока ионов гелия на поверхность и флюенса (суммарного потока на поверхность) [93]. При температуре подложки менее ~530 °С такой пористый слой не формируется, а при большей температуре подложки он интенсивно растёт (рис. 32). Обнаружено сильное

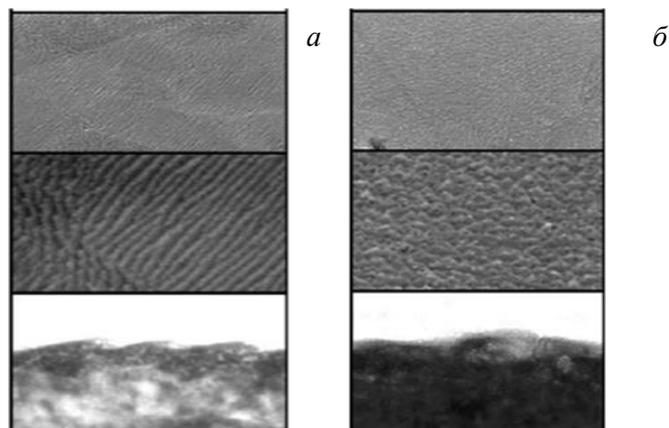


Рис. 32. Рост пористого вольфрама в зависимости от температуры подложки, поток гелия на подложку $5,1 \cdot 10^{25}$ ат./м² при температуре подложки 773 (а) и 973 К (б)

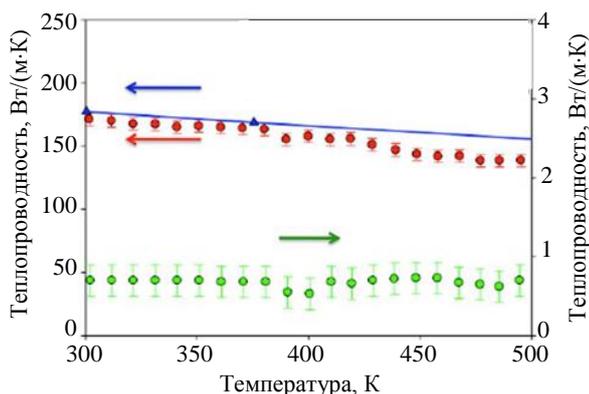


Рис. 33. Теплопроводность исходного (●) и пористого (●) вольфрама (экспериментальные данные [115]), справочные данные для вольфрама (▲)

уменьшение теплопроводности таких образцов вольфрама (рис. 33) [115].

Образование пористого вольфрама на глубине до 2 мкм зарегистрировано также в экспериментах после 10 000 импульсов с большим фактором потока энергии (рис. 34).

В гелиевой плазме в установке PISCES требуется около 30 мин, чтобы сформировать пористый вольфрам на поверхности (рис. 35).

Эксперименты с экспозицией вольфрама в стеллараторе LHD показали зависимость свойств пористости от числа разрядов.

Наиболее детально процесс образования пористого вольфрама при облучении гелиевой плазмой про-

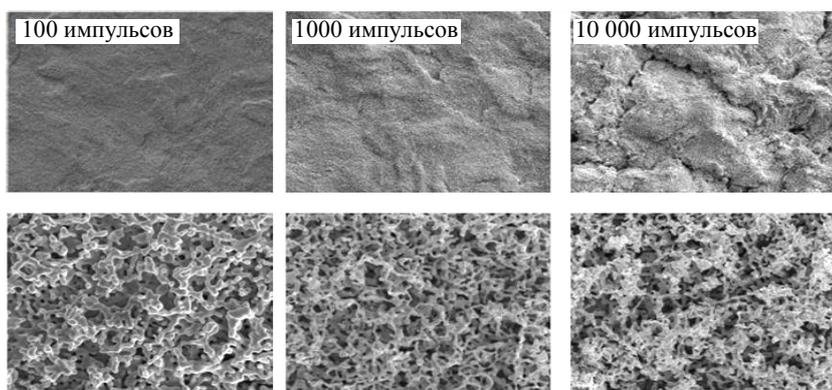


Рис. 34. Изменение структуры вольфрама при экспонировании в гелиевой плазме: рост пористых слоёв для различного числа импульсов [116]. Поток плазмы с тепловым фактором $19,9 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-0,5}$



Рис. 35. СЭМ-изображение пористого вольфрама, образованного в гелиевой плазме в установке PISCES-B: температура подложки 1200 К, время экспозиции 4290 с, поток ионов гелия $\text{He}^+ 2\cdot 10^{26}$ частиц/м², энергия ионов гелия 45 эВ [117]

ведён на малой плазменной установке [50, 106]. В этих экспериментах зарегистрированы параметры взаимодействия плазмы с пористой поверхностью — происходит изменение потенциального профиля в переходном слое между плазмой и поверхностью, что изменяет перенос плазмы и теплового потока из плазмы на поверхность (рис. 36). Предсказывается, что в ИТЭР микроструктура вольфрамовой поверхности (изменённой под действием гелиевой плазмы, в результате которого образуется пористый воль-

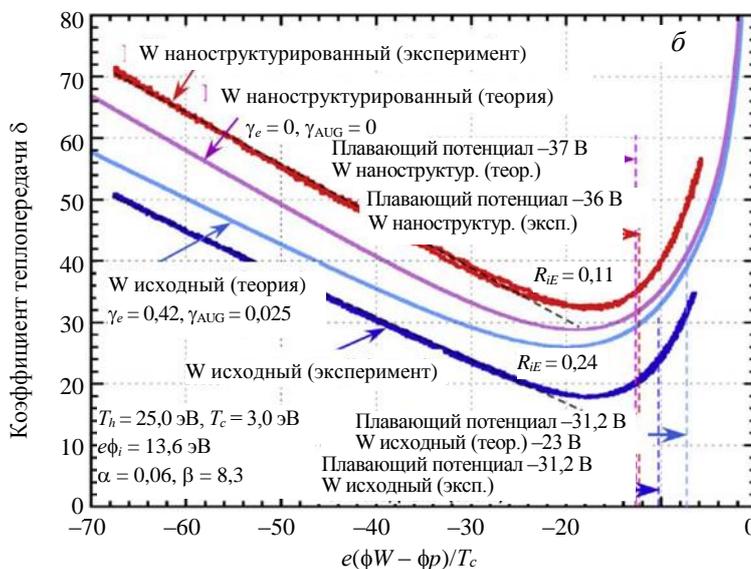
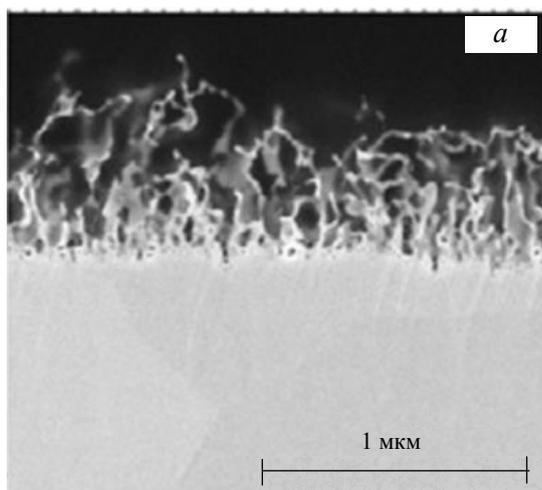


Рис. 36. Металлографический срез поверхности пористого вольфрама (а); изменение коэффициента теплопередачи из плазмы на поверхность в зависимости от падения приповерхностного потенциала (нормированного) для металлического и пористого вольфрама, сравнение эксперимента с теорией (б) [50]

фрам) может иметь коэффициент передачи тепла на поверхность в 2 раза больше в сравнении с обычной поверхностью металлического вольфрама при стандартных условиях распределения потенциала в переходном слое (sheath-layer). Требуется экспериментальное и теоретическое исследование этого эффекта.

Наноструктурированный вольфрам, полученный после экспозиции в установке NAGDIS-II, исследовался в установке MAGNUM-PSI, где он подвергался интенсивному плазменному и лазерному воздействию, имитируя воздействие ЭЛМов в ИТЭР [95]. В этих экспериментах зарегистрированы эффекты изменения свойств плавления (уменьшение температуры плавления поверхности, структуры) такого наноструктурированного материала.

Теоретическое рассмотрение механизмов образования пористого вольфрама ещё только начинается ([118] и ссылки).

Важность исследования влияния пористых слоёв вольфрама (дугообразование, комбинированное воздействие импульсных тепловых нагрузок и повышенного потока частиц, восстановление пористых слоёв после мощных импульсных нагрузок, накопление трития и др.) на производительность работы ИТЭР кратко обсуждается и суммируется в обзоре [4], в том числе отмечается, что такие пористые слои могут значительно влиять на порог разрушения поверхности, что требует дополнительного экспериментального исследования.

ВЛИЯНИЕ ВОЛЬФРАМА НА СВОЙСТВА ПЛАЗМЫ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМА—СТЕНКА

Эксперименты в JET с ИТЭР-подобной стенкой (ILW) [119] продемонстрировали заметное влияние вольфрама на характеристики удержания плазмы (рис. 37, а). В JET влияние вольфрама проявилось в виде изменения мощности излучения, зарегистрированного на периферии. Это объясняется влиянием вольфрамовых капель, поступающих в плазму со стенки при её плавлении, оценка интенсивности излучения из плазмы позволила определить размер капель ~100 мкм. В таких разрядах требуется более высокий уровень напуска газа, чтобы поддерживать высокую частоту ЭЛМов и высокую плотность на периферии. В токамаке ASDEX-U [33] зарегистрировано увеличение концентрации вольфрама в центре разряда в моменты эмиссии вольфрама в диверторный объём (предположительно в моменты плавления вольфрамовой стенки) (рис. 37, б).

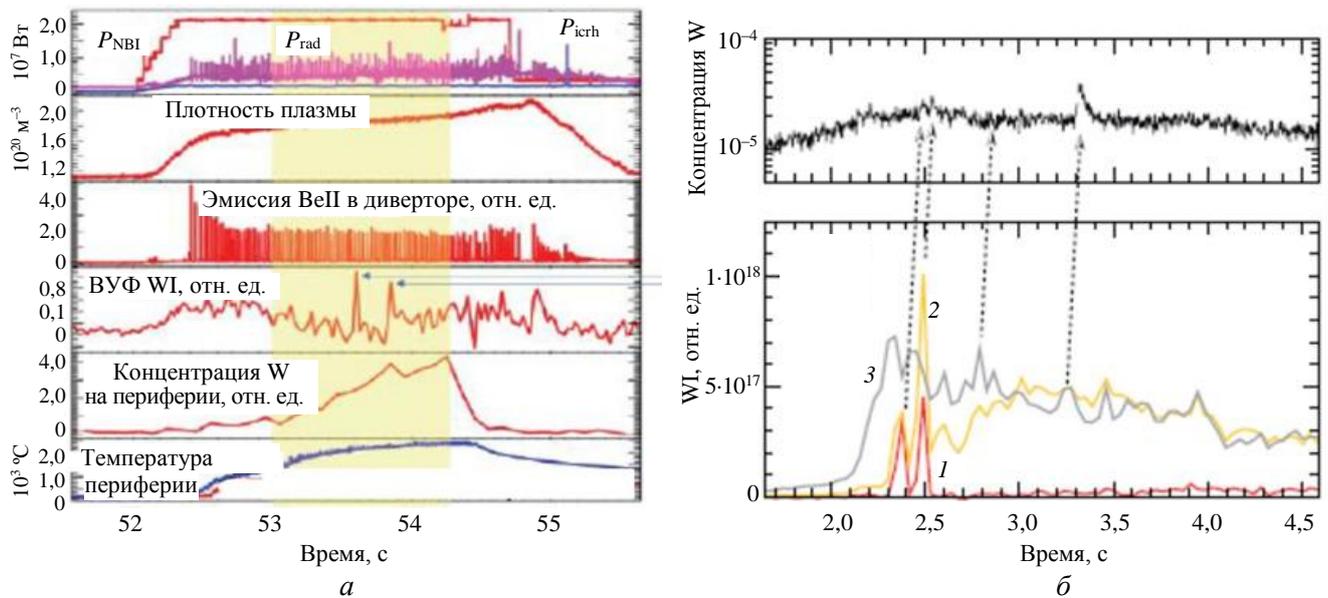


Рис. 37. Типичные параметры разряда: в JET с вольфрамовым дивертором ILW № 84 782, ток 3 МА, магнитное поле 2,87 Тл (стрелками указаны события эжекции вольфрамовых капель размером до 100 мкм) (а); в ASDEX-U с вольфрамовым дивертором, спектроскопические измерения концентрации вольфрама (интенсивность излучения WI 400,9 нм) в центральной зоне разряда (вверху) и в диверторе (внизу) при экспозиции в разряде с плавлением вольфрамовых пластин [33]: 1, 2, 3 — хордовые измерения в различных зонах дивертора (б)

Диаграммы скейлингов H_{98} приведены на рис. 38 для экспериментов с ILW (стенкой типа ИТЭР) в токамаках JET и ASDEX-U с вольфрамовой стенкой, проведены сравнения результатов, полученных с

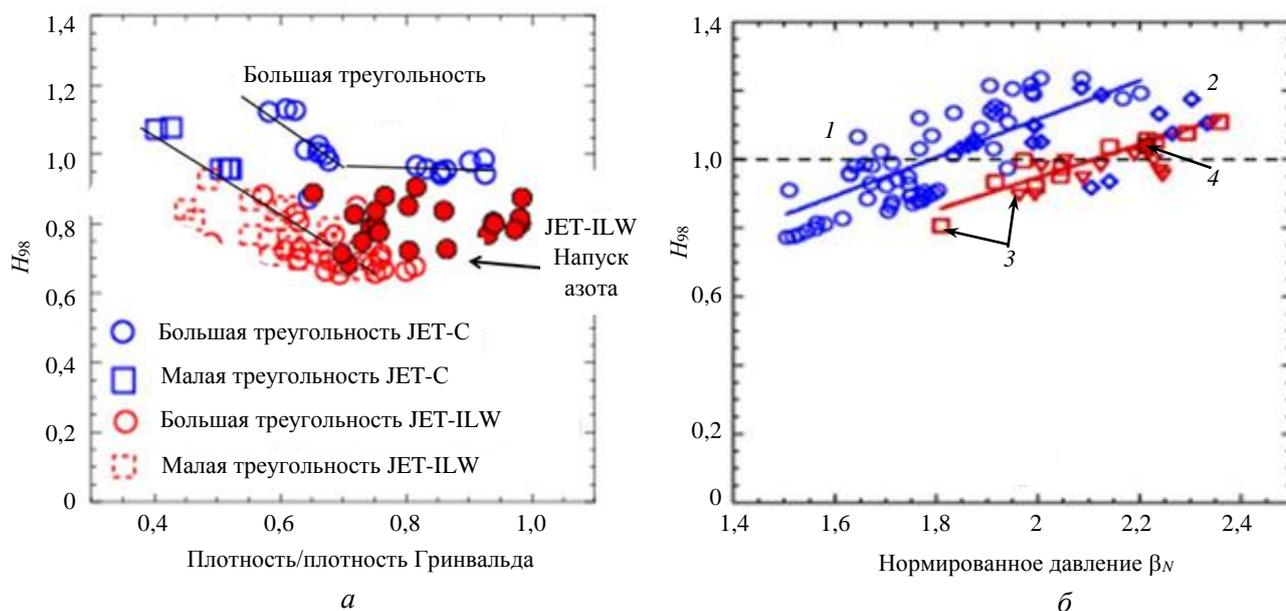


Рис. 38. Диаграммы параметров удержания в экспериментах с вольфрамовой стенкой JET (а), ASDEX-U (б): 1 — AUG-C, $\delta \leq 0,16$; 2 — AUG-C, $0,25 \leq \delta \leq 0,35$; 3 — AUG-W, $0,32 \leq \delta \leq 0,36$; 4 — AUG-W, $\delta = 0,36 + N_2$

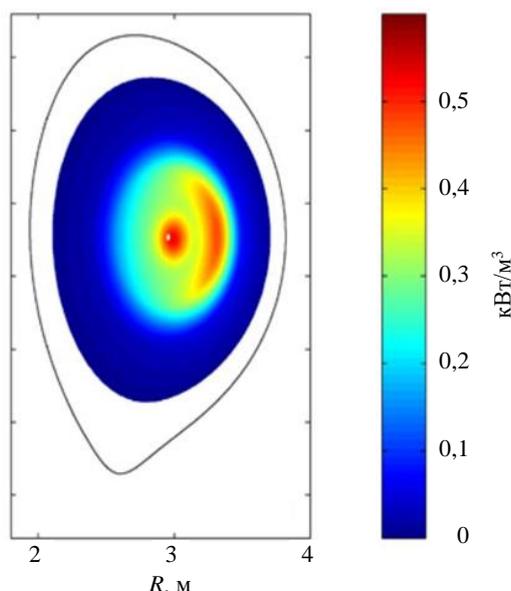


Рис. 39. Излучение SXR от W в токамаке JET № 85 307 (разряды с NBI + ICRH) [121]



Рис. 40. Микрофотография СЭМ поверхности вольфрамового зонда после эксплуатации в плазме токамака T-10, наблюдается шероховатая структура

вольфрамовой и графитовой стенкой. Увеличение треугольности, мощности нагрева или напуска азота (JET) помогает компенсировать спад удержания [120].

Из-за большой массы и заряда ионы вольфрама испытывают влияние сильной электростатической силы и инерции, что приводит к полоидальной асимметрии — во вращающейся плазме центробежная сила вызывает локализацию примесей в области низкого поля на внешнем обводе тора. Эта асимметрия наблюдается в эксперименте на JET [121] (рис. 39) и описывается моделями [122—125].

Влияние шероховатой поверхности диверторных пластин. Эксперименты с вольфрамовыми зондами в токамаках показали, что поверхность W-металла изменяется — формируется нерегулярная шероховатость с масштабами до нескольких десятков микрон, например, в токамаке T-10 (рис. 40).

Такое изменение геометрии поверхности приводит к изменению параметров взаимодействия плазма—стенка. Шероховатая поверхность имеет пониженную электро- и теплопроводность в сравнении с кристаллической гладкой поверхностью металла.

Шероховатость и уменьшение проводимости поверхности вольфрама могут значительно изменить:

- электрические поля вблизи поверхности;
- динамику пыли над поверхностью;
- характеристики амбиполярности.

Такие изменения могут привести к следующим эффектам:

- изменение электрических полей над поверхностью
- изменяет поток плазмы на поверхность, т.е. может нару-

шиться баланс потоков в пристеночной плазме. Это, в свою очередь, может изменить условия удержания плазмы в диверторе и пристеночной плазме;

— шероховатость поверхности (пористость) уменьшает прочностные характеристики материала, такая поверхность — потенциальный источник пыли. Движение (динамика) пыли определяется геометрией электрических полей над поверхностью. Теоретический анализ показывает, что пыль над скорректированной (негладкой) поверхностью может двигаться нерегулярно, например, по циклоиде с изменяемым случайно радиусом [126]. В результате пылевые частицы могут проникать далеко в горячий слой плазмы, приводя к радиационному охлаждению периферии плазменного разряда;

— изменение проводимости шероховатой поверхности вызывает изменение амплитуды тока из плазмы на поверхность, что влияет на характеристики амбиполярности. Изменение параметров неамбиполярного переноса в пристеночной плазме может значительно изменить условия глобального удержания плазмы в токамаке.

Переосаждение бериллия на поверхность вольфрама. В ИТЭР под действием плазмы бериллий (Be) будет эродировать с поверхности первой стенки, поступающий в плазму материал будет переосаждаться на поверхности диверторных вольфрамовых пластин. Взаимодействие бериллия с вольфрамом может приводить к образованию W—Be-сплавов с относительно невысокой температурой плавления. Такие композитные W/Be-материалы будут иметь отличные от исходных металлов физико-химические свойства.

Проведённые плазменные испытания бериллиевых пластин в установке КСПУ-Be [67] при плазменных нагрузках, ожидаемых в ИТЭР [127, 128], показали, что в условиях ИТЭР при плазменных воздействиях ЭЛМов и срывов будет происходить интенсивная эрозия бериллиевых облицовочных пластин камеры токамака. Материалы эрозии будут переосаждаться в виде слоёв микронной толщины на вольфрамовые пластины дивертора ИТЭР. Эти переосаждённые слои под воздействием ЭЛМов и срывов могут деформироваться, разрушаться и, в свою очередь, эродировать и переосаждаться на диверторные пластины. Такие процессы могут приводить:

— к образованию пылевых частиц из разрушаемого переосаждённого слоя, что будет отрицательно влиять на плазму ИТЭР;

— к формированию на диверторных пластинах ИТЭР слоёв бериллия и, возможно, композитных материалов Be + W с неоднородным рельефом. Такие неоднородные слои могут обеспечивать особые свойства взаимодействия плазма—стенка — образование мишенной плазмы с экранирующим эффектом, изменение свойств электронной эмиссии и проводимости поверхности при воздействии ЭЛМов и срывов, вызывая изменение свойств пристеночной плазмы и аномального транспорта, в том числе эффект, известный как детачед-плазма с улучшенными свойствами удержания плазмы в токамаке.

В настоящее время отсутствуют экспериментальные результаты испытаний бериллиевых слоёв, переосаждённых в плазме токамака на вольфраме, физико-химические свойства таких материалов не исследованы. В [128] описаны первые результаты испытания образцов из бериллия ТГП-56ПС и вольфрама в условиях переосаждения бериллия и бериллийподобного материала (алюминия) после воздействия на материалы импульсов плазменного излучения в разрядах большой мощности до $0,5 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}$ и длительностью до $0,5\text{—}1 \text{ мс}$, что моделирует условия воздействия ЭЛМов в ИТЭР. Испытания образцов проводились на установках КСПУ-Be и КСПУ-Т. Вольфрамовые пластины с напылённым бериллийподобным материалом (алюминиевым слоем толщиной 5 и 10 мкм) подвергались воздействию водородной плазмы в КСПУ-Т при нагрузках $0,3\text{—}0,5 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}$. После испытаний в КСПУ-Т отсутствует видимое изменение плёнки при нагрузках ниже $0,3 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}$. При нагрузке $0,35 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}$ наблюдается переплавление исходной структуры напылённого алюминия. При нагрузке $0,4 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}$ наблюдается разрушение плёнки: плёнка отслаивается, образуются капли и поры. Переплавленный алюминий агломерируется в структуры с шероховатой поверхностью. При нагрузке $0,5 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}$ плёнка алюминия в меньшей степени дезинтегрирована на образцах, предварительно обработанных плазмой с плотностью энергии $2 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}$.

Количество алюминия на вольфраме остаётся больше для образца, предварительно облучённого плазмой (82% в сравнении с 63% для вольфрама, не облучённого плазмой), т.е. наблюдается повышенная стойкость в сравнении с образцами вольфрама с исходной (не обработанной плазмой) структурой вольфрама.

На установке PISCES-B [129] в стационарных разрядах с He- и D-плазмой экспонировались мишени из вольфрама, покрытые тонкой плёнкой бериллия толщиной около 1 мкм. С целью имитации срывов и ЭЛМов эти мишени во время экспонирования в плазме подвергались облучению лазерными импульсами длительностью 1—10 мс и фактором поглощённого мишенью тепла $\sim 90 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-0,5}$. При таком лазерном воздействии изменяется морфология бериллиевой плёнки на вольфраме, включая образование Ве—W-сплавов, плавление, корригирование и испарение бериллиевого слоя.

Требуются дальнейшие испытания вольфрамовых пластин дивертора ИТЭР в условиях формирования переосаждённых слоёв бериллия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вольфрам предложен для изготовления элементов первой стенки и дивертора ИТЭР и ДЕМО, учитывая его высокую температуру плавления, высокую теплопроводность, низкие характеристики распыления под воздействием энергичных частиц. Однако ожидается разрушение поверхности вольфрама при критических нагрузках в токамаке реакторного размера при импульсных процессах (срывах, ЭЛМах и др.), что может вызывать повышенную эрозию поверхности и поступление вольфрама в центральные зоны разряда, приводя к ухудшению свойств удержания плазмы.

Тепловые нагрузки на вольфрамовые пластины дивертора ИТЭР в стационарной стадии DT-разряда будут достигать $\sim 10 \text{ МВт} \cdot \text{м}^{-2}$, приводя к повышению температуры пластин в среднем до $\sim 1100 \text{ }^\circ\text{C}$. В срывах и ЭЛМах импульсные кратковременные нагрузки на диверторные пластины будут достигать величины гигаваттного масштаба $\sim 0,6\text{—}3,5 \text{ ГВт} \cdot \text{м}^{-2}$, что может привести к плавлению вольфрама. Стоит задача оценки последствий возможного плавления и растрескивания вольфрама, эрозии, образования пылевых частиц и формирования пористых слоёв на поверхности вольфрамовых пластин в ИТЭР при критических и субкритических тепловых нагрузках. Исследование таких процессов важно также для решения проблемы первой стенки в термоядерных установках следующего поколения, планируемых к сооружению в России (ТИН, ДЕМО).

Для исследования стойкости вольфрамовых пластин дивертора ИТЭР применяются установки с электронными и ионными пучками, плазменные ускорители, в которых моделируются различные импульсные и стационарные плазменно-тепловые нагрузки, ожидаемые в ИТЭР.

Исследования стойкости вольфрама осуществляются в токамаках JET, AUG, Alcator C-Mod, стеллараторе LHD, планируются в токамаке T-10 [130]. В экспериментах с использованием установок с мощными электронными пучками (IDTF, JUDITH-2 и др.) было обнаружено, что термоудар и термоциклирование индуцируют структуру трещин, размер которых зависит от микроструктуры (формы и размера гранул) используемой марки вольфрама и от температуры мишени. При испытании в плазменном ускорителе КСПУ-Т вольфрамовых пластин, используемых для изготовления дивертора ИТЭР, импульсными плазменными нагрузками до $2 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$ (что соответствует срыву в ИТЭР) обнаружены переплавление, образование крупномасштабных и мелкомасштабных трещин, малоизученные изменения поверхности и рекристаллизация вольфрама на глубину до 50 мкм с образованием хрупкой структуры. Стойкость такой вольфрамовой поверхности в плазме токамака не исследовалась. В условиях стационарного плазменного воздействия в токамаке повышается риск эрозии, роста трещин. Хрупкое разрушение в переотверждённом слое и капельная эрозия с расплавленной поверхности могут формировать частицы субмикронного размера, которые при поступлении в плазму могут ухудшить параметры разряда. Изменённая структура вольфрама (трещины, пористые слои и т.п.) может обеспечивать условия для повышенного накопления (сорбции) рабочего газа. Оценка сорбции трития в поверхности таких вольфрамовых пластин будет важна для ИТЭР. Стойкость переплавленной (рекристаллизованной) структуры вольфрама необходимо исследовать непосредственно в условиях взаимодействия плазма—стенка в токамаке. Такой вывод следует из результатов испытания вольфрама в токамаках JET и ASDEX-U, где обнаружено отличие процессов разрушения и движения расплавленных слоёв вольфрама в условиях плазмы токамака в сравнении с испытаниями при других условиях (электронными и ионными пучками и др.). В JET было зарегистрировано перемещение оплавленного материала вольфрамовой пластины поперёк магнитного

поля. Это вызвано эффектами взаимодействия плазма—стенка в магнитном поле токамака — протеканием токов из плазмы на поверхность в условиях магнитного поля, термоэлектронной эмиссией и др.

Для исследования всех эффектов воздействия на вольфрамовые пластины, ожидаемых в ИТЭР, необходим комплекс испытаний, которые моделируют переменное воздействие ЭЛМов, срывов и плазменной нагрузки стационарного разряда. Такая уникальная возможность существует в России, где накоплен опыт проведения испытаний в токамаках (Т-10), плазменных ускорителях (КСПУ-Т) нагрузками уровня ЭЛМов и срывов в ИТЭР, термоциклирования мощными электронными пучками (IDTF). Для максимального приближения к условиям ИТЭР представлена программа [130] проведения экспериментов и испытаний вольфрама в переменных условиях с экспозицией. Исходя из описанных проблем, стоит задача дополнительной защиты поверхности вольфрамовых пластин дивертора в ИТЭР. Рассматриваются предложения защиты такой поверхности с помощью покрытия/напыления на неё композитных материалов, лития, карбида бора и др., в том числе возобновляемых покрытий непосредственно в разряде токамака [18]. Перспективным также представляется использовать в качестве защитной поверхности пористую вольфрамовую структуру (англ. — fuzz). Изменённая микроструктура поверхности вольфрамовых пластин, обращённых к плазме, может изменить условия взаимодействия плазма—стенка. Ожидаются эффекты взаимного влияния вольфрамовой рекристаллизованной шероховатой поверхности и приповерхностной плазмы, включая эффекты повышенной термоэмиссии негладкой поверхности и связанные с этим эффекты изменения передачи тепла из плазмы на поверхность, дуговые процессы, образование пылевых частиц и влияние на процессы переноса тепла и плазмы. Такие процессы в экспериментах, в том числе на токамаках, не исследовались. Вместе с тем все эти эффекты могут значительно влиять на стабильность пристеночной плазмы и параметры переноса тепла из плазмы на материальную поверхность. Изготовление и эксплуатация вольфрамового дивертора ИТЭР требуют дополнительных испытаний и изучения стойкости вольфрама в условиях повышенных плазменно-тепловых нагрузок, в том числе срывов и ЭЛМов.

Автор выражает благодарность Л.Н. Химченко, Ю.В. Мартыненко за полезные обсуждения. Работа выполнена при частичной поддержке ГК «Росатом».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Pitts R.A., Carpentier S., Escourbiac F., Hirai T., Komarov V., Lisgo S. et al.** A full tungsten divertor for ITER: physics issues and design status. — *J. Nucl. Mater.*, 2013, vol. 438, p. 48—56.
2. **Philipps V.** Tungsten as material for plasma-facing components in fusion devices. — *Ibid.*, 2011, vol. 415, S2—S9.
3. **Shimada M., Pitts R., Loarte A., Campbell D.J., Sugihara M., Mukhovatov V., Kukushkin A., Chuyanov V.** ITER research plan of plasma-wall interaction. — *Ibid.*, 2009, vol. 390—391, p. 282—285.
4. **Ueda Y., Coenen J.W., De Temmerman G., Doerner R.P., Linke J., Philipps V., Tsitrone E.** Research status and issues of tungsten plasma facing materials for ITER and beyond. — *Fusion Eng. Des.*, 2014, vol. 89, p. 901—906.
5. **Будаев В.П., Мартыненко Ю.В., Карпов А.В. и др.** Рекристаллизация и растрескивание вольфрама при тепловых нагрузках, ожидаемых в ИТЭР. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2013, т. 36, вып. 3, с. 53.
6. **Linke J., Loewenhoff T., Massaut V., Pintsuk G., Ritz G., Rodig M., Schmidt A., Thomser C., Uytendhouwen I., Vasechko V., Wirtz M.** Performance of different tungsten grades under transient thermal loads. — *Nucl. Fusion*, 2011, vol. 51, p. 073017.
7. **Budaev V.P., Martynenko Yu.V., Karpov A.V. et al.** Tungsten recrystallization and cracking under iter-relevant heat loads. — *J. Nucl. Mater.*, 2015, vol. 463, p. 237—240.
8. **Loarte A. et al.** Progress on the application of ELM control schemes to ITER scenarios from the non-active phase to DT operation. — *Nucl. Fusion*, 2014, vol. 54, p. 033007.
9. **Loarte A. et al.** Transient heat loads in current fusion experiments, extrapolation to ITER and consequences for its operation. — *Phys. Scr.*, 2007, vol. 128, p. 222—228.
10. **Lassner E., Schubert W.-D.** Tungsten: Properties, Chemistry, Technology of the Element, Alloys, and Chemical Compounds. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 1999.
11. **Хрипунов Б.И., Гуреев В.М., Данелян Л.С., Затекин В.В., Койдан В.С., Куликаускас В.С., Латушкин С.Т., Петров В.Б., Рязанов А.И., Унежев В.Н.** Анализ поверхности вольфрама после облучения быстрыми ионами и дейтериевой плазмой. — *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные источники*, 2014, № 3, с. 34.
12. **Khripunov B.I., Brukhanov A.N., Gureev V.M., Koidan V.S., Kornienko S.N., Latushkin S.T., Petrov V.B., Ryazanov A.I., Semenov E.V., Stolyarova V.G., Unezhev V.N., Danelyan L.S., Kulikauskas V.S., Zatekin V.V., Vostrikov V.G., Romanovsky E.A.** Plasma effect on tungsten damaged by high-energy alpha particles: erosion and deuterium trapping. — *J. Nucl. Mater.*, 2011, vol. 415, S649—S652.
13. **Khripunov B., Gureev V., Koidan V., Latushkin S., Petrov V., Ryazanov A., Semenov E., Stolyarova V., Unezhev V., Danelyan L., Kulikauskas V., Zatekin V.** Plasma impact on materials damaged by high-energy ions. — *Phys. Scr.*, 2011, vol. 145, p. 014052.

14. **Khripunov B.I., Gureev V.M., Koidan V.S., Kornienko S.N., Latushkin S.T., Petrov V.B., Ryazanov A.I., Semenov E.V., Stolyarova V.G., Danelyan L.S., Kulikauskas V.S., Zatekin V.V., Unezhev V.N.** — *J. Nucl. Mater.*, 2013, vol. 438, S1014—S1018.
15. **Wirtz M., Linke J., Pintsuk G. et al.** Comparison of the thermal shock performance of different tungsten grades and the influence of microstructure on the damage behavior. — *Phys. Scr.*, 2011, vol. 145, p. 014058
16. **Wirtz M. et al.** Comparison of thermal shock damages induced by different simulation methods on tungsten. — *J. Nucl. Mater.*, 2013, vol. 438, S833.
17. **Huber A. et al.** Investigation of the impact on tungsten of transient heat loads induced by laser irradiation, electron beams and plasma guns. — *Fusion Sci. Technol.*, 2013, vol. 63(1T), p. 197—200.
18. **Азизов Э.А., Айрапетов А.А., Беграмбеков Л.Б., Бужинский О.И., Вергазов С.В., Грунин А.В., Гордеев А.А. и др.** Установка для нанесения покрытия карбида бора и тестирования материалов и покрытий при интенсивном плазменном облучении. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2014, т. 37, вып. 4, с. 30.
19. **Климов Н.С., Подковыров В.Л., Жиглухин А.М.** Разбрызгивание вольфрама при воздействии интенсивного потока плазмы. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2009, вып. 2, с. 52—62.
20. **Zhitlukhin A. et al.** Effect of ELMs on ITER divertor armour materials. — *J. Nucl. Mater.*, 2007, vol. 363—365, p. 301.
21. **Makhlaj V.A., Garkusha I.E., Aksenov N.N., Bazylev B. et al.** Plasma exposure of different tungsten grades with plasma accelerators under ITER-relevant conditions. — *Phys. Scr.*, 2014, p. 014040.
22. **Rieth M., Dudarev S.L., Gonzalez de Vicente S.M., Akta J. et al.** Recent progress in research on tungsten materials for nuclear fusion applications in Europe. — *J. Nucl. Mater.*, 2013, vol. 432, p. 482—500.
23. **Kuznetsov V., Gorbenko A., Davydov V. et al.** Status of the IDTF high-heat-flux test facility. — *Nuclear Engineering and Design Fusion*, 10/2014, vol. 89(7).
24. **Hirai T. et al.** Status of technology R&D for the ITER tungsten divertor monoblock. — *J. Nucl. Mater.*, 2015, vol. 463, p. 1248—1251.
25. **De Temmerman G., van den Berg M.A., Scholten J., Lof A., van der Meiden H.J., van Eck H.J.N., Morgan T.W., de Kruijf T.M., van Emmichoven P.A.Z., Zielinski J.J.** High heat flux capabilities of the Magnum-PSI linear plasma device. — *Fusion Eng. Des.*, 2013, vol. 88, p. 483—487.
26. **Nicolai D., Chaumet P., Neubauer O., Uhlemann R.** New options for material testing at the material ion beam test facility MARION. — *Ibid.*, p. 2506—2509.
27. **Goebel D.M., Campbell G., Conn R.W.** Plasma surface interaction experimental facility (PISCES) for materials and edge physics studies. — *J. Nucl. Mater.*, 1984, vol. 121, p. 277—282.
28. **De Temmerman G., Zielinski J.J., van Diepen S. et al.** ELM-simulation experiments on Pilot-PSI using simultaneous high flux plasma and transient heat/particle source. — *Nucl. Fusion*, 2011, vol. 51, p. 073008.
29. **Burdakov A. et al.** — *Fusion Sci. Technol.* 2007, vol. 51(2T), p. 106.
30. **Kikuchi Y., Nishijima D., Nakatsuka M. et al.** Surface damage characteristics of CFC and tungsten with repetitive ELM-like pulsed plasma irradiation. — *J. Nucl. Mater.*, 2011, vol. 415, p. S55—S58.
31. **Neu R., Arnoux G., Beurskens M., Bobkov V., Brezinsek S. et al.** First operation with the JET international thermonuclear experimental reactor-like wall. — *Phys. Plasmas*, 2013, vol. 20, p. 056111.
32. **Thomser C.V., Bailescu S., Brezinsek J.W., Coenen H., Greuner T., Hirai J., Linke C.P., Lungu H., Maier G., Matthews Ph., Mertens R., Neu V., Philipps V., Riccardo M., Rubel C., Ruset A., Schmidt I., Uytendhouwen, and JET EFDA contributors.** Plasma facing materials for the JET ITER-like wall. — *Fusion Sci. Technol.*, 2012, vol. 62, p. 1.
33. **Coenen J.W., Krieger K., Lipschultz B., Dux R., Kallenbach A., Lunt T., Mueller H.W., Potzel S., Neu R., Terra A., and the ASDEX Upgrade and TEXTOR Teams.** Evolution of Surface Melt Damage, its Influence on Plasma Performance and Prospects of Recovery. PSFC/JA-12-72, May 10, 2013, Plasma Science and Fusion Center Massachusetts Institute of Technology Cambridge, MA 02139 USA, (I-1).
34. **ASDEX Upgrade Team, Balden M., Rohde V., Lindig S., Manhard A., Krieger K.** Blistering and re-deposition on tungsten exposed to ASDEX Upgrade divertor plasma. — *J. Nucl. Mater.*, 2013, vol. 438, S220.
35. **Мартыненко Ю.В., Московкин П.Г.** О капельной эрозии металлов под действием срывов плазмы в токамаках. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2000, вып. 1, с. 65—69.
36. **Loarte A. et al.** Progress in the ITER physics basis. Chap. 4. Power and particle control. — *Nucl. Fusion*, 2007, vol. 47, S203—S263.
37. **Eich T. et al.** Scaling of the tokamak near scrape-off layer H-mode power width and implications for ITER. — *Nucl. Fusion*, 2013, vol. 53, p. 093031.
38. **Stangeby P.C.** *The Plasma Boundary of Magnetic Fusion Devices*, CRC. Press, 2000.
39. **Kukushkin A.S., Pacher H.D., Kotov V. et al.** — *Fusion Eng. Des.*, 2011, vol. 86, p. 2865.
40. **Campbell D.J. et al.** — In: *Proc. 24th Intern. Conf. on Fusion Energy*. San Diego, CA, 2012. ITR/P1-18; www.naweb.iaea.org/napc/physics/FEC/FEC2012/index.htm.
41. **Federici G. et al.** Assessment of erosion of the ITER divertor targets during type I ELMs. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2003, vol. 45, p. 1523.
42. **Lehnen M., Campbell D.J.** Status of R&D for ITER Disruption Loads, Disruption Mitigation and Runaway Electron Avoidance 25 IAEA FEC. St. Petersburg, Russia, 2014, EX/P3-18.
43. **Huijsmans G.T.A., Loarte A.** Non-linear MHD simulation of ELM energy deposition. — *J. Nucl. Mater.*, 2013, vol. 438(12), S57—S63.
44. **Huijsmans G.T.A., Loarte A.** Non-linear MHD simulation of ELM energy deposition. — *Nucl. Fusion*, 2013, vol. 53, p. 123023.
45. **Pitts R.A. et al.** A full tungsten divertor for ITER: physics issues and design status. — *J. Nucl. Mater.*, 2013, vol. 438, p. S48—S56.

46. **Linke J.** High heat flux performance of plasma facing materials and components under service conditions in future fusion reactors. — *Fusion Sci. Technol.*, 2006, vol. 49, p. 455—464.
47. **Loarte A. et al.** Characteristics of type I ELM energy and particle losses in existing devices and their extrapolation to ITER. — *Plasma Phys. Controlled Fusion*, 2003, vol. 45, p. 1549—1569.
48. **Будаев В.П., Химченко Л.Н.** О фрактальной структуре осажденных пленок в токамаке. — *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 2007, т. 131, № 4, с. 711—728.
49. **Будаев В.П., Химченко Л.Н.** Фрактальная нано- и микроструктура осажденных пленок в термоядерных установках. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2008, вып. 3, с. 34.
50. **Takamura S.** Power transmission factor through the sheath in deuterium plasmas for virgin as well as nanostructured tungsten. — *J. Nucl. Mater.*, 2015, vol. 463, p. 325—328.
51. **Мартыненко Ю.В.** Частное сообщение.
52. **Маханьков А.Н.** Вольфрамовая облицовка диверторной мишени для термоядерного реактора токамак. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2003. 125 с.
53. **Safronov V.M., Arkhipov N.I., Klimov N.S. et al.** Investigation of erosion mechanisms and erosion products in tungsten targets exposed to plasma heat loads relevant to ELMS and mitigated disruptions in ITER. — *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics* (14), 2008, № 6, p. 52—54.
54. **Garkusha I.E. et al.** Damage to preheated tungsten targets after multiple plasma impacts simulating ITER ELMs. — *J. Nucl. Mater.*, 2009, vol. 386—388, p. 127—131.
55. **Van Rooij G.J. et al.** Tungsten divertor erosion in all metal devices: lessons from the ITER like wall of JET. — *Ibid.*, 2013, vol. 438, S42—S47.
56. **Gavila P. et al.** High heat flux testing of EU tungsten monoblock mock-ups for the ITER divertor. — *Fusion Eng. Des.*, 2014 (in press).
57. **Bardin S. et al.** Evolution of transiently melt damaged tungsten under ITER-relevant divertor plasma heat loading. — *J. Nucl. Mater.*, 2015, vol. 463, p. 193—197.
58. **Ueda Y. et al.** Research status and issues of tungsten plasma facing materials for ITER and beyond. — *Fusion Eng. Des.*, 2014, vol. 89, p. 901—906.
59. **Ezato K.** Progress of ITER full tungsten divertor technology qualification in Japan. — *Ibid.*, 2015, vol. 4; DOI: 10.1016/j.fusengdes.2015.03.009.
60. **Mertens Ph., Thompson V., Matthews G.F. et al.** Bulk tungsten in the JET divertor: Potential influence of the exhaustion of ductility and grain growth on the lifetime. — *J. Nucl. Mater.*, 2013, vol. 438, p. S401—S405.
61. **Linke J., Loewenhof Th., Маккин V. et al.** Performance of different tungsten grades under transient thermal loads. — *Nucl. Fusion*, 2011, vol. 51, p. 073017.
62. **Burdakov A.V., Chagin M.N., Filippov V.V. et al.** On a possibility of explosive material erosion under conditions of ITER disruption events. — *J. Nucl. Mater.*, 1996, vol. 233, Part 1, p. 697—700.
63. **Garkusha I.E. et al.** The latest results from ELM-simulation experiments in plasma accelerators. — *Phys. Scripta.*, 2009, vol. T138, p. 014054.
64. **Arzhannikov A.V., Bataev V.A., Bataev I.A. et al.** Surface modification and droplet formation of tungsten under hot plasma irradiation at the GOL-3. — *J. Nucl. Mater.*, 2013, vol. 438, S677—S680.
65. **Loewenhof Th., Linke J., Pintsuk G., Pitts R.A., Riccardi B.** ITER-W monoblocks under high pulse number transient heat loads at high temperature. — *J. Nucl. Mater.*, 2015, vol. 463, p. 202—205.
66. **Loewenhof T., Linke J., Pintsuk G., Thomser C.** Tungsten and CFC degradation under combined high cycle transient and steady state heat loads. — *Fusion Eng.*, 2012, vol. 87, p. 1201.
67. **Kovalenko D.** Optimization of QSPA-Be plasma gun facility for ITER ELM, disruption, and mitigated disruption simulation experiments. Preliminary results of Be erosion under ELM-like plasma heat loads. — In: *Proc. 13th PFMC Workshop/1st FEMAS Conf. Rosenheim, Germany*, 2011.
68. **Hyogo U.** Plasma gun exposure W. ITPA SOLDiv Meeting. Kanazawa, Japan, 2014.
69. **Klimov N. et al.** Experimental study of PFC erosion under ITER-like transient loads at plasma gun facility QSPA. — *J. Nucl. Mater.*, 2009, vol. 390, p. 721.
70. **Klimov N. et al.** Experimental study of PFC erosion and eroded material deposition under ITER-like transient loads at plasma gun facility QSPA. — *J. Nucl. Mater.*, 2011, vol. 415, p. S59.
71. **Loewenhof Th., Bürger A., Linke J., Pintsuk G., Schmidt A., Singheiser L., Thomser C.** Evolution of tungsten degradation under combined high cycle edge-localized mode and steady-state heat loads. — *Phys. Scr.*, 2011, vol. T145, p. 014057.
72. **Loewenhof Th.** Post-mortem analyses of ITER monoblocks exposed to high pulse number electron beam and plasma ELM-like loads. — In: *Influence of Recrystallization, 19th ITPA Divertor-SOL Topical Group Meeting. München, Germany, 01/21/2014* — 01/21/2014.
73. **Linke J., Loewenhof T., Massaut V., Pintsuk G., Ritz G., Rodig M. et al.** Performance of different tungsten grades under transient thermal loads. — *Nucl. Fusion*, 2011, vol. 51, p. 073017.
74. **Pintsuk G., Loewenhof Th.** Impact of microstructure on the plasma performance of industrial and high-end tungsten grades. — *J. Nucl. Mater.*, 2013, vol. 438, S945.
75. **Barnard H.S., Lipschultz B., Whyte D.G.** A study of tungsten migration in the Alcator C-Mod divertor. — *Ibid.*, 2011, vol. 415, S301-S304.
76. **Крауз В.И., Мартыненко Ю.В., Свечников Н.Ю., Смирнов В.П., Станкевич В.Г., Химченко Л.Н.** Наноструктуры в установках управляемого термоядерного синтеза. — *УФН*, 2010, т. 180, № 10, с. 1055—1080.

77. **Архипов Н.И., Сафронов В.М., Барсук В.А. и др.** Эрозия углеграфитовых материалов при облучении интенсивными потоками плазмы. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2009, вып. 4, с. 3.
78. **Мартыненко Ю.В.** Движение расплавленного слоя металла и капельная эрозия при воздействии плазменных потоков, характерных для переходных режимов ИТЭР. — Там же, 2014, т. 37, вып. 2, с. 53—59.
79. **Мартыненко Ю.В., Московкин П.Г.** О капельной эрозии металлов под действием срывов плазмы в токамаках. — Там же, 2000, вып. 1, с. 65—69.
80. **Мартыненко Ю.В.** Эрозия поверхности металла в результате образования волнообразного рельефа под действием мощных плазменных потоков. — Там же, 2012, вып. 3, с. 41.
81. **Недоспасов А.В.** Физика пристеночной плазмы в токамаках. — УФН, 1987, т. 152, с. 479.
82. **Barengolts S.A., Mesyats G.A., Tsventoukh M.M.** The ecton mechanism of unipolar arcing in magnetic confinement fusion devices. — Nucl. Fusion, 2010, vol. 50, p. 125004.
83. **Kim H.-S. et al.** Recrystallization of bulk and plasma-coated tungsten with accumulated thermal energy relevant to Type-I ELM in ITER H-mode operation. — J. Nucl. Mater., 2015, vol. 463, p. 215—218.
84. **Huber A., Arakcheev A., Sergienko G. et al.** Investigation of the impact of transient heat loads applied by laser irradiation on ITER-grade tungsten. — Phys. Scr., 2014, p. 014005.
85. **Farid N., Zhao D., Oderji H.Y., Ding H.** Cracking and damage behavior of tungsten under ELM's-like energy loads using millisecond laser pulses. — J. Nucl. Mater., 2015, vol. 463, p. 241—245.
86. **Van Eden G.G., Morgan T.W., van der Meiden H.J. et al.** The effect of high-flux H plasma exposure with simultaneous transient heat loads on tungsten surface damage and power handling. — Nucl. Fusion, 2014, vol. 54, p. 123010.
87. **Lehnen M. et al.** Disruptions in ITER and strategies for their control and mitigation. — J. Nucl. Mater., 2015, vol. 463, p. 39—48.
88. **Roth J. et al.** Recent analysis of key plasma-wall interaction issues for ITER. — Ibid., 2009, vol. 390—391, p. 1.
89. **Sugiyama K., Mayer M., Rohde V., Balden M., Dürbeck Th., Herrmann A., Lindig S., Wiltner A., Müller H.W., Neu R., the ASDEX Upgrade team.** Deuterium inventory in the full-tungsten divertor of ASDEX Upgrade. — Nucl. Fusion, 2010, vol. 50, p. 035001.
90. **Tsitrone E., Pégourié B., Marandet Y. et al.** Multi machine scaling of fuel retention in 4 carbon dominated tokamaks. — J. Nucl. Mater., 2011, vol. 415, S75.
91. **Brezinsek S. et al.** Fuel retention studies with the ITER-like Wall in JET. — Ibid., 2013, vol. 53, p. 083023.
92. **Sugiyama K. et al.** Consequences of deuterium retention and release from be-containing mixed materials for ITER tritium inventory control. — J. Nucl. Mater., 2011, vol. 415, S731.
93. **Temmerman G., de Bystrov K., Doerner R.P. et al.** Helium effects on tungsten under fusion-relevant plasma loading conditions. — Ibid., 2013, vol. 438, S78—S83.
94. **Schmid K. et al.** An integrated model of impurity migration and wall composition dynamics for tokamaks. — Ibid., 2011, vol. 415, S284.
95. **Kajita S., Temmerman G., de Morgan Th., van Eden S., de Kruif T., Ohno N.** Thermal response of nanostructured tungsten. — Nucl. Fusion, 2014, vol. 54, p. 033005.
96. **Roth J. et al.** Tritium inventory in ITER plasma-facing materials and tritium removal procedures. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2008, vol. 50, p. 103001.
97. **Skinner C.H. et al.** Recent advances on hydrogen retention in ITER's plasma-facing materials: beryllium, carbon and tungsten. — Fus. Sci. Techn., 2008, vol. 54, p. 891.
98. **Brezinsek S. et al.** Fuel retention studies with the ITER-like Wall in JET. — Nucl. Fusion, 2013, vol. 53, p. 083023.
99. **Alimov K.V., Shu W.M., Roth J., Lindig S., Balden M., Isobe K. et al.** Temperature dependence of surface topography and deuterium retention in tungsten exposed to low-energy, high-flux D plasma. — J. Nucl. Mater., 2011, vol. 417, p. 572.
100. **Ueda Y., Peng H.Y., Lee H.T., Ohno N., Kajita S., Yoshida N.** Helium effects on tungsten surface morphology and deuterium retention. — Ibid., 2013, vol. 442(1—3), p. 267.
101. **Koga K., Iwashita S., Kiridoshi S. et al.** Characterization of dust particles ranging in size from 1nm to 10 μ m collected in the LHD. — Plasma and Fusion Research, 2009, vol. 4, p. 034.
102. **Залавутдинов Р.Х., Городецкий А.Е., Захаров А.П. и др.** Морфология и состав пыли и крупных частиц, образующихся в токамаке Глобус-М. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2011, вып. 1, с. 39.
103. **Heinola K., Ayres C.F., Baron-Wiechec A., Coad J.P., Likonen J., Matthews G.F., Widdowson A., JET-EFDA contributors.** Tile profiler and gravimetric analysis of samples from JET ITER-like Wall and carbon wall. — In: Proc. 14th Intern. Conf. on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications. Jülich, Germany, 13—17 May 2013, p. A164.
104. **Widdowson A. et al.** Comparison of JET main chamber erosion with dust collected in the divertor. — J. Nucl. Mater., 2013, vol. 438, S827.
105. **Мартыненко Ю.В., Нагель М.Ю.** Образование пыли в токамаке. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2009, вып. 3, с. 43—48.
106. **Takamura S.** Initial stage of fiber-form nanostructure growth on refractory metal surfaces with helium plasma irradiation. — Plasma and Fusion Research: Letters, 2014, vol. 9, p. 1302007.
107. **Nishijima D., Ye M.Y., Ohno N., Takamura S.** Incident ion energy dependence of bubble formation on tungsten surface with low energy and high flux helium plasma irradiation. — J. Nucl. Mater., 2003, vol. 313—316, p. 97.
108. **Nishijima D., Ye M.Y., Ohno N., Takamura S.** Formation mechanism of bubbles and holes on tungsten surface with low-energy and high-flux helium plasma irradiation in NAGDIS-II. — Ibid., 2004, vol. 329—333, p. 1029.
109. **Takamura S., Ohno N., Nishijima D., Kajita S.** Formation of nanostructured tungsten with arborescent shape due to helium plasma irradiation. — Plasma and Fusion Research, 2006, vol. 1, p. 051.

110. **Baldwin M.J., Doerner R.P.** Helium induced nanoscopic morphology on tungsten under fusion relevant plasma conditions. — Nucl. Fusion, 2008, vol. 48, p. 035001.
111. **Baldwin M.J., Doerner R.P.** Formation of helium induced nanostructure «fuzz» on various tungsten grades. — Ibid., 2010, vol. 404, p. 165.
112. **Temmerman G. De, Bystrov K., Doerner R.P., Marot L., Wright G.M., Woller K.B. et al.** Helium effects on tungsten under fusion-relevant plasma loading conditions. — Ibid., 2013, vol. 438, S78.
113. **Wright G.M., Brunner D., Baldwin M.J., Doerner R.P., Labombard B., Lipschultz B. et al.** Tungsten nanotendrils growth in the Alcator C-Mod divertor. — Nucl. Fusion, 2003, p. 042003.
114. **Miyamoto M. et al.** Systematic investigation of the formation behavior of helium bubbles in tungsten. — J. Nucl. Mater., 2015, vol. 463, p. 333—336.
115. **Roedig M. et al.** Post irradiation testing of samples from the irradiation experiments PARIDE 3 and PARIDE 4. — Ibid., 2004, vol. 329—333, p. 766—770.
116. **Loewenhoff T., Greuner H., Linke J. et al.** Impact of combined transient plasma/heat loads on tungsten performance. — In: 21th PSI Conf. Kanazawa, Japan, 2014.
117. **Baldwin M.J. et al.** Helium induced nanoscopic morphology on tungsten under fusion relevant plasma conditions. — Nucl. Fusion, 2008, vol. 48, p. 035001.
118. **Мартыненко Ю.В., Нагель М.Ю.** Модель образования «пуха» на поверхности вольфрама. — Физика плазмы, 2012, т. 38, № 12, с. 1082—1086.
119. **Romanelli F. and JET EFDA Contributors.** Overview of the JET results with the ITER-like wall. — Ibid., 2013, vol. 53, p. 104002.
120. **Beurskens M.N.A., Schweinzer J., Angioni C. et al.** The effect of a metal wall on confinement in JET and ASDEX Upgrade. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2013, vol. 55, p. 124043.
121. **Casson F.J., Angioni C., Belli E.A., Bilato R., Mantica P., Odstrcil T., Putterich T., Valisa M., Garzotti L., Giroud C., Hobirk J., Maggi C.F., Mlynar J., Reinke M.L., JET EFDA Contributors and ASDEX-Upgrade Team.** Theoretical description of heavy impurity transport and its application to the modeling of tungsten in JET and ASDEX upgrade. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2015, vol. 57, p. 014031.
122. **Belli E. et al.** Pfirsch—Schlüter neoclassical heavy impurity transport in a rotating plasma. — Ibid., 2014, vol. 56, p. 124002.
123. **Mollen A. et al.** Impurity transport in Alcator C-Mod in the presence of poloidal density variation induced by ion cyclotron resonance heating. — Ibid., 2014, vol. 56, p. 124005.
124. **Henderson S.S. et al.** Neoclassical and gyrokinetic analysis of time-dependent helium transport experiments on MAST. — Nucl. Fusion, 2014, vol. 54, p. 093013.
125. **Angioni C. et al.** Tungsten transport in JET H-mode plasmas in hybrid scenario, experimental observations and modelling. — Ibid., p. 083028.
126. **Budaev V.P., Yakovlev M.** On fractal properties of equipotentials over a real rough surface faced to plasma in fusion devices. — Plasma and Fusion Research: Rapid Communications, 2008, vol. 3, p. 001.
127. **Будаев В.П., Химченко Л.Н., Житлухин А.М., Мартыненко Ю.В., Сафронов В.М., Карпов А.В., Климов Н.С., Подковыров В.Л., Белова Н.Е., Барсук В.А., Коваленко Д.В., Позняк И.М., Путрик А.Б., Рогов А.В., Ярошевская А.Д.** Исследование взаимодействия высокотемпературной плазмы с вольфрамом в условиях переосаждения бериллия. — В сб.: XVI конференция «Взаимодействие плазмы с поверхностью». Москва, НИЯУ МИФИ, 1—2 февраля 2013 г., с. 28.
128. **Klimov N.S., Podkovyrov V.L., Zhitlukhin A.M. et al.** Plasma-facing materials erosion under ITER-like transient loads at QSPA plasma gun facility. — Fusion Sci. and Technol., 2014, vol. 66, p. 118—124.
129. **Yu J.H. et al.** ITER-relevant transient heat loads on tungsten exposed to plasma and beryllium. — Phys. Scr., 2014, p. 014036.
130. **Будаев В.П., Мартыненко Ю.В., Грашин С.А., Карпов А.В., Химченко Л.Н., Мазуль И.В., Гиниятулин Р.Н., Житлухин А.М., Бергамбеков Л.Б.** Программа экспериментов на токамаке Т-10 в поддержку вольфрамового дивертора ИТЭР. — В сб.: XLII Международная звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Звенигород, Москва, 9—13 февраля 2015 г.



Вячеслав Петрович Будаев, в.н.с., д.ф.-м.н., лауреат премии им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
budaev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20 июня 2015 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2015, т. 38, вып. 4, с. 5—33.