УДК 538.971

ЭФФЕКТЫ ДУГООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ДЕЙСТВИИ ПЛАЗМЫ НА ВОЛЬФРАМОВЫЕ КОМПОНЕНТЫ ПЕРВОЙ СТЕНКИ В ТОКАМАКЕ

В.П. Будаев^{1, 2}, Л.Н. Химченко³, С.А. Грашин¹, А.В. Карпов¹

¹НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

³Проектный центр ИТЭР, Москва, Россия

В статье приведены последние экспериментальные исследования вольфрамовых материалов после экстремальных плазменных нагрузок в токамаке Т-10. Плазменная нагрузка на поверхность вольфрамовых лимитеров приводит к эрозии и формированию неоднородной шероховатой поверхности. Условия в приповерхностной плазме над шероховатой поверхностью благоприятны для формирования дуг и искр, влияющих на перегрев поверхности материала. Влияние униполярных дуг и искр на взаимодействие плазмы с поверхностью может привести к усилению теплообмена плазмы с поверхностью и к охлаждению плазмы. Неамбиполярный поток из-за дуговых эффектов рекомендуется учитывать при оценке эрозии диверторных вольфрамовых пластин в ИТЭР.

Ключевые слова: токамак, дивертор, плазменно-тепловые испытания материалов, материалы термоядерного реактора, вольфрам, дуги.

ARCING EFFECTS ON TOKAMAK FIRST WALL TUNGSTEN COMPONENTS EXPOSED TO PLASMA LOADS

V.P. Budaev^{1, 2}, L.N. Khimchenko³, S.A. Grashin¹, A.V. Karpov¹

¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²National Research University «MPEI», Moscow, Russia

³Project Center ITER, Moscow, Russia

The paper summarizes recent experimental observations of tungsten materials exposed to extreme hot plasma loads in the T-10 tokamak. Plasma load on the material surface leads to erosion effects. Conditions in plasma sheath over the roughen surface and melts are favourable for arcs and sparks ignition affecting the overheating of the material surface. The effects of unipolar arcs and sparking on plasma-surface interaction can lead to an enhanced heat transfer from plasma to a surface and to a plasma cooling. The nonambipolar flow due to the arcs and sparks effects should be analysed to evaluate the erosion of the divertor tungsten tiles in the ITER.

Key words: tokamak, divertor, plasma test of materials, fusion materials, tungsten, arcs.

DOI: 10.21517/0202-3822-2019-42-1-51-56

ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие горячей плазмы с материальной поверхностью при очень высокой тепловой нагрузке на материалы в термоядерных установках (токамаках, стеллараторах и др.) вызывает множественные эффекты изменения поверхности, включая эрозию и переосаждение эродированных материалов на поверхность, плавление и движение расплава по поверхности, неоднородное отверждение расплава и рекристаллизацию, образование трещин различных размеров, дуговые эффекты [1]. Эти изменения поверхности под действием горячей плазмы вызывают охрупчивание и значительное изменение структуры поверхности материала на глубину от десятков до тысяч микрон [1]. Коллективные эффекты в таком сложном процессе приводят к стохастической кластеризации слоёв на поверхности на масштабах от десятков нанометров до сотен микрон, образуя шероховатость поверхности с чрезвычайно высокой удельной площадью [1, 2].

Условия в плазменном слое над шероховатой поверхностью и расплавами благоприятны для инициации униполярных дуг и искр [3–5], влияющих на перегрев поверхности материала. Эффекты дугообразования ранее традиционно исследовались в токамаках с графитовыми компонентами первой стенки и не рассматривались в таких условиях, как доминирующий механизм, ввиду преимущества механизма распыления графита. В токамаках с металлической облицовкой обращённых к плазме элементов первой стенки эта проблема вновь стала актуальной, и в недавнее время в экспериментах на токамаках Т-10, D-III-D, AUG, стеллараторе LHD и др. предприняты специальные исследования дуговой эрозии, например, исследования в токамаке D-III-D [6, 7]. В таких экспериментах наблюдались различные эффекты дугообразования, но внимание при анализе поверхности традиционно уделялось отдельным трекам дуг. Вместе с тем требуется провести анализ в условиях ИТЭР, где возможны эффекты одномоментного действия множественных дуг, что в результате может привести к качественным изменениям условий их зажигания и эволюции.

Эффект униполярных дуг на взаимодействие плазмы с поверхностью может привести к повышенному переносу тепла от плазмы к поверхности [8, 9]. Механизмы экстремально больших переносов тепла и потоков частиц из плазмы на поверхность включают эктонный механизм, который вызван явлением взрывной электронной эмиссии при последовательном зажигании дуг или искр [5, 8]. В отличие от стандартной термоэмиссии такой механизм может значительно увеличить эмиссию электронов из дуговых катодных пятен, что в результате увеличивает токи и вызывает перегрев и плавление поверхности. Такие процессы изучены в явлении вакуумных дуг [5, 8—10], но не исследованы экспериментально в плазменных термоядерных установках. Первые теоретические оценки показывают, что поток тепла на поверхность при действии эктонного механизма может увеличиться на порядок величины [11].

Чтобы оценить этот эффект и его вклад в нагрев первой стенки и дивертора в термоядерном реакторе, в том числе в токамаке ИТЭР, необходимо проанализировать имеющиеся экспериментальные данные о действиях дуг и искр, наблюдаемых на поверхности материала после облучения плазмой в термоядерных установках. В настоящей работе приводится эмпирический анализ ранее не наблюдавшихся явлений экстремальной эрозии вольфрамовых материалов при плазменном воздействии в токамаке Т-10, включая наблюдения множественных дуговых кратеров на поверхности вольфрамовой облицовки вблизи последней замкнутой магнитной поверхности, что может привести дополнительные аргументы для учёта дуговой эрозии при интерпретации имеющихся экспериментальных данных и оценке эрозии в крупномасштабных токамаках.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ВОЛЬФРАМОВЫМИ ДИАФРАГМАМИ В ТОКАМАКЕ Т-10

В экспериментах на токамаке Т-10 [12, 13] с вольфрамовыми диафрагмами (лимитерами) были зарегистрированы эффекты повышенных тепловых нагрузок на край полоидальной диафрагмы на внутреннем обводе при длительности такой нагрузки более 100 мс (т.е. в квазистационарных условиях) в серии из ~400 разрядов в экспериментальной кампании 2017 г. [4, 12]. Экстремально большие нагрузки формировались в токамаке Т-10 в разрядах с СВЧ-нагревом плазмы, в которых большая часть теплового потока из плазменного шнура (около 100 кВт) фокусировалась на небольшой поверхности (площадью около 20 см²) вольфрамовых пластин диафрагмы на внутреннем обводе, вызывая нагрев края этих пластин до высокой температуры. Область перегрева регистрировалась видеокамерой в видимом свете в течение фазы СВЧ-нагрева. Оценки, проведённые по интенсивности светимости из зоны перегрева, показали, что температура превышала 2000 °С (следует принимать это как нижнюю границу оценки ввиду невысокой точности метода такой оценки).

Такая повышенная плазменно-тепловая нагрузка вызвала значительные изменения структуры поверхности вольфрамовых пластин диафрагмы: эрозию, локальное плавление, растрескивание поверхности вольфрамовых пластин (рис. 1, 2). Размер вольфрамовых пластин 67×38×10 мм, все пластины имеют электрический контакт с камерой токамака, изготовленной из нержавеющей стали. Наблюдались трещины различных размеров: мелкомасштабные — микрометровых размеров и крупномасштабные — миллиметровых размеров. Радиальный размер крупномасштабных трещин был больше, чем ширина радиального спада продольной энергии, которая для токамака Т-10 составляет величину около 5—7 мм [1]. Было обнаружено разрушение поверхностных слоёв материальной поверхности после расплава в некоторых зонах, наблюдалось отслоение поверхностных слоёв после расплава в некоторых зонах (см. рис. 2).

Рис. 1. Плавление и эрозия вольфрамовой пластины на внутреннем обводе полоидальной диафрагмы в токамаке Т-10

Рис. 2. Трещины на поверхности вольфрамовых пластин на внутреннем обводе полоидальной диафрагмы в токамаке Т-10

Визуальный и микроскопический анализ поверхности пластин после завершения экспериментальной кампании (около 400 стабильных разрядов) выявил большие зоны плавления поверхности вольфрамовых пластин в области рёбер, контактирующих с горячей плазмой основной области разряда. Эти зоны соответствовали зонам поверхности диафрагмы на внутреннем обводе, из которых видеокамерой регистрировалось интенсивное излучение в видимом свете в период СВЧ-нагрева плазмы. Напомним, что температура плавления вольфрама 3460 °С, требуемый поток тепла на поверхность должен быть более 50 МВт/м².

При этом на внешнем обводе диафрагмы не наблюдались аналогичные эффекты эрозии в стационарной фазе плазменного разряда, отсутствовало свечение пластин вольфрамовой диафрагмы на внешнем обводе (это регистрировалось видеокамерой). Визуальный и микроскопический анализ этих вольфрамовых пластин с внешнего обвода диафрагмы после завершения экспериментальной кампании не выявил следы эрозии, аналогичные тем, что наблюдались на внутреннем обводе.

НАБЛЮДЕНИЕ КРАТЕРОВ ДУГ И ИСКР НА МАТЕРИАЛАХ, ОБРАЩЁННЫХ К ПЛАЗМЕ

Наибольшая эрозия наблюдалась в зонах вблизи края (рёбра) вольфрамовых пластин и торцевой поверхности, обращённой к центру плазменного разряда, на пластинах (изначально гладких) наблюдается (см. рис. 1, 2) рельеф с трещинами глубиной от нескольких микрометров до миллиметра и более, кратерами глубиной до нескольких десятков микрометров, зонами оплавления на масштабах до нескольких сантиметров вдоль ребра пластин. В зонах интенсивного дугообразования на поверхности пластин, обращённых и к ионной стороне (т.е. вектору тока ионов в тороидальном направлении), и к электронной стороне (т.е. вектору тока электронов в тороидальном направлении) пластин, наблюдались кратеры дуг (рис. 3). Исследование этих зон поверхности вольфрамовых пластин методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) выявило кратеры диаметром от 1 до 100 мкм. Наблюдались множественные кратеры диаметром 1—5 мкм (рис. 4), которые могут быть идентифицированы как искровые кратеры. Обнаружены в большом количестве глубокие дуговые кратеры диаметром 30—100 мкм (рис. 5, 6). Такие кратеры можно характеризо-

Рис. 3. Кратеры и треки дуг на поверхности полоидальной вольфрамовой диафрагмы на внутреннем обводе в токамаке T-10

Рис. 4. Неоднородный рельеф в зоне максимальной эрозии края вольфрамовой пластины полоидальной диафрагмы на внутреннем обводе в токамаке T-10: 1 — кратеры размером ~2 мкм

Рис. 5. Глубокий кратер катодного пятна 2-го типа на внутреннем обводе вольфрамовой диафрагмы в токамаке T-10 [15]

Рис. 6. Глубокие кратеры на вольфрамовой диафрагме на внутреннем обводе в токамаке T-10

вать в соответствии с принятой классификацией [14]. Как известно, различают катодные пятна первого и второго типа [14]. Пятна первого типа оставляют после себя много мелких кратеров, отстоящих друг от друга на некотором расстоянии. Пятна второго типа формируют кратеры либо наложенные, либо касающиеся друг друга, они возникают при пороговом токе, приводящем к делению одиночного пятна. Такая форма кратеров в виде наложенных трёх кратеров наблюдается на рис. 5, 6, что можно интерпретировать как результат катодного пятна второго типа. Катодные кратеры наблюдаются как на исходной вольфрамовой поверхности, так и на поверхности, остывшей после плавления, вызванного плазменной нагрузкой.

Характер наблюдаемой эрозии поверхности вольфрама после повышенной плазменно-тепловой нагрузки указывает на эктонный механизм электронной эмиссии (взрывной эмиссии электронов) [5, 8], приводящий к повышенному разогреву поверхности в условиях самоподдерживающегося процесса, что может приводить к расплавлению поверхности в зоне дугообразования.

На переплавленной поверхности в зоне значительного изменения формы поверхности края вольфрамовой пластины наблюдался неоднородный рельеф с множественными кратерами дуг и искр. На рис. 4 показан пример такой поверхности с развитым стохастическим шероховатым рельефом с размерами неоднородностей, начиная от десятков нанометров. Такая неоднородная поверхность благоприятна для инициации униполярных дуг — условия в плазменном слое над шероховатой поверхностью и расплавом благоприятны для формирования дуг и искр. Следует отметить, что неоднородная шероховатая поверхность типично наблюдается в зонах действия мощной плазменной нагрузки в термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы [1]. Эта шероховатая поверхность является основой

для формирования дуговых процессов, которые способны поддерживать степень неоднородности и шероховатости.

На рис. 7 показана ассоциация кратеров как свидетельство эволюции дугового процесса эктонного типа, когда последовательность катодных пятен первого типа с малым током дуги, формирующей кратеры малым диаметром 1—10 мкм [14], переходит в последовательность катодных пятен второго типа с большим током дуги (кратеры с большим диаметром до 100 мкм, состоящие из наложенных кратеров), как и предсказывается моделью, рассматривающей эктонный механизм дуговых процессов [5, 8].

Рис. 7. СЭМ-изображение ассоциации кратеров на вольфраме, наблюдается последовательность кратеров 1-го и 2-го типов как свидетельство эволюции дугового процесса эктонного типа [15]

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наблюдаемые на поверхности дуговые кратеры имеют диаметр от ~ 1 до ~ 100 мкм (см. рис. 1—3). Для кратеров $r \sim 10$ мкм в диаметре время термодиффузии оценивается как $\tau \sim r^2/\gamma \sim 1$ мкс, предполагая коэффициент термодиффузии $\gamma \sim 1$ см²/с. Время $\tau \sim 1$ мкс существенно меньше, чем типичные временные масштабы 10—100 мкс крупномасштабных флуктуаций плотности плазмы и электрического поля, обусловленные пристеночной плазменной турбулентностью [16, 17]. Такие условия обеспечивают неизменность пристеночного плазменного слоя в течение развития одного дугового процесса, что обеспечивает независимость от флуктуаций приповерхностной плазмы токамака эволюции дуги, и есть основания применять для описания этих дуговых процессов выводы известных моделей дуговых явлений [4, 5, 8—10]. Характер эрозии поверхности вольфрама после повышенной плазменно-тепловой нагрузки указывает на эктонный механизм электронной эмиссии (взрывной эмиссии электронов) [9, 10], приводящий к повышенному разогреву поверхности в условиях самоподдерживающегося процесса, что может приводить к расплавлению поверхности в зоне дугообразования.

Ток в дуге и размер кратера можно оценить, используя известные результаты экспериментального наблюдения вакуумной дуги на нагретых вольфрамовых проволоках [18], экспериментальных

исследований катодных пятен [14]. Систематическое исследование пятен показало, что ток на пятно меняется в широких пределах и зависит от ряда факторов, в том числе от скорости перемещения пятна [14], ток на одиночное пятно может достигать величины 10—100 А. Для групповых пятен на вольфраме этот ток может быть больше в несколько раз. В экспериментах на вольфраме величина плотности тока колеблется от 10^5 до 10^8 А/см² [14], что можно использовать для оценки площади и диаметра кратера — диаметр кратера оценивается величиной от 10 до 100 мкм. Подробные описания и оценки размеров дуговых кратеров на различных материалах можно найти в обзорах [5, 8, 14]. Такие оценки могут быть приняты во внимание для интерпретации наблюдения кратеров диаметром несколько десятков микрометров на поверхности вольфрама (см. рис. 5—7).

Процессы при взаимодействии плазма—стенка включают как механизмы переноса в слое над поверхностью [3], так и коллективные эффекты, способные формировать шероховатую поверхность [19, 20]. В работе [4] рассмотрены эффекты взаимодействия плазма—стенка, при которых униполярные дуги могут приводить к выносу дополнительного теплового потока из плазмы на поверхность, приводящего к охлаждению приповерхностной плазмы. Предполагается, что неамбиполярный поток, обусловленный дугами и искрами, приводит к наблюдаемому перегреву поверхности вольфрама [4]. Для оценки этого эффекта и его вклада в нагрев первой стенки в термоядерном реакторе, в том числе в ИТЭР, следует накопить и систематизировать экспериментальную базу данных эффектов дугообразования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ поверхности вольфрамовых пластин после плазменных испытаний в токамаке Т-10 выявил эффекты дугообразования. Дуговые кратеры и треки наблюдались на пластинах вольфрама после серии 400 экспериментов на токамаке Т-10 в разрядах с СВЧ-нагревом. Наблюдаемые на поверхности дуговые кратеры имеют диаметр от ~1 до ~100 мкм. Множественные эффекты эрозии, такие как растрескивание, плавление поверхностного слоя, движение расплавленного металла по поверхности, рекристаллизация расплавленного слоя, формируют шероховатую поверхность. Эти эффекты наблюдались на краях вольфрамовых пластин. Условия в плазменном слое над шероховатой поверхностью и расплавом благоприятны для формирования дуг и искр. Воздействие униполярных дуг и искр на взаимодействие плазмы с поверхностью может привести к повышенному переносу тепла от плазмы к поверхности и к охлаждению плазмы за счёт неамбиполярного потока. Эффекты дугообразования рекомендуется учитывать для прогнозирования и оценки эрозии диверторных вольфрамовых пластин в ИТЭР.

Работы по анализу экспериментальных данных выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-19-01469, образцы вольфрама были получены в экспериментах на токамаке Т-10, проведённых при поддержке ГК «Росатом» (контракт № Н.4х.241.9Б.17.1011).

REFERENCES

1. **Budaev V.P.** — Physics of Atomic Nuclei, 2016, vol. 79 (7), p. 1137.
2. **Takamura S., Ohno N., Nishijima D., Kajita S.** — Plasma and Fusion Research: Rapid Communications, 2006, vol. 1, p. 051.
3. **Nedospasov A.V.** — Soviet Physics Uspekhi, 1987, vol. 30(7), pp. 620—627.
4. **Khimchenko L.N. et al.** — In: SOFE-2017. Shanghai, 06 June 2017, T.OA2.496.
5. **Mesyats G.A.** — Phys. Usp., 1995, vol. 38, p. 567.
6. **Rudakov D.L. et al.** — J. Nucl. Mater., 2013, vol. 438, S805—8.
7. **Bykov I. et al.** — Phys. Scr., 2017, vol. T170, p. 014034.
8. **Mesyats G.A.** — IEEE Trans. Plasma Sci., 2013, vol. 41, pp. 676—694.
9. **Barengolts S.A., Mesyats G.A., Tsventoukh M.M.** — JETP, 2008, vol. 107, p. 1039.
10. **Shmelev D.L., Barengolts S.A.** — IEEE Trans. Plasma Sci., 2013, vol. 41(8), p. 1959.
11. **Tsventoukh M.M.** — Physics of Plasmas, 2018, vol. 25, p. 053504.
12. **Vershkov V.A. et al.** — Nuclear Fusion, 2017, vol. 57, № 10, p. 102017.
13. **Savrukhin P.V., Shestakov E.A.** — Nuclear Fusion, 2015, vol. 55, p. 043016.

14. **Lyubimov G.A., Rakhovskiy V.I.** — UFN (APhS), 1978, vol. 125, pp. 665—705 (in Russian).
15. **Budaev V.P. et al.** — J. Phys.: Conf. Ser., 2018, vol. 1094, p. 012006.
16. **Budaev V.P. et al.** — Phys. Usp., 2011, vol. 54, p. 875.
17. **Budaev V.P. et al.** — J. of Plasma Physics, 2015, vol. 81, p. 06 395810602.
18. **Puchkarev V.F., Murzakaev A.M.** — J. Phys. D: Appl. Phys., 1990, vol. 23, p. 26.
19. **Budaev V.P.** — Physics Letters A 381, 2017, vol. 43, p. 3706.
20. **Budaev V.P.** — JETP Letters, 2017, vol. 105(5), pp. 307—313.

AUTHORS

Budaev V.P. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; National Research University «Moscow Power Engineering Institute», ul. Krasnokazarmennaya 14, 111250 Moscow, Russia; budaev@mail.ru

Khimchenko L.N. Project Center ITER, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Grashin S.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; SAGrashin@nrcki.ru

Karpov A.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Received 15 October 2018

Revised 15 December 2018

Accepted 18 December 2018

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2019, vol. 42, issue 1, pp. 51—56