А. В. Недоспасов, Г. В. Сергиенко, О капельно-паровой эрозии стенок термоядерных установок,
ТВТ, 2010, том 48, выпуск 2, 303–305

ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР, 2010, том 48, № 2, с. 303–320

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 533.924

О КАПЕЛЬНО-ПАРОВОЙ ЭРОЗИИ СТЕНОК ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

© 2010 г. А. В. Недоспасов*, Г. В. Сергиенко**

*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

**Institute fur Energy Research – Plasma Physics, Forschungszentrum Jülich GmbH, EURATOM Association, Trilateral Euregio Cluster, 52425 Jülich, Germany

Поступило в редакцию 07.10.2009 г.

ВВЕДЕНИЕ

На стенки термоядерных установок с магнитным удержанием могут воздействовать импульсные потоки энергии большой удельной мощности. В токамаках они неизбежны при срывах тока, например в международном экспериментальном термоядерном реакторе ИТЭР [1]. Поэтому выбор материалов для первой стенки и диверторных пластин реактора токамака является одной из основных проблем. Применительно к диверторным пластинам ИТЭР проектные проработки и экспериментальные исследования связываются с использованием вольфрама [2, 3]. Значительные потоки энергии из плазмы могут перераспределяться на поверхности, вызывая локальные перегревы, при которых удельные потоки заметно отличаются от средних значений. Под воздействием плазмы эрозия металлических поверхностей может носить капельно-паровой характер. Нагрев поверхности приводит к ее испарению, а плавление и движение, по тем или иным причинам, расплава вызывает капельную эрозию. Интенсивность эрозии зависит от распределения потоков энергии, давления и параметров пристеночной плазмы.

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ

Перераспределение потоков энергии из плазмы на горячую стенку представляет самостоятельную физическую задачу. Можно указать, по крайней мере, три причины, приводящие к такому перераспределению: униполярные дуговые разряды, тепловая контракция в результате термоэлектронной эмиссии и тепловая контракция, связанная с ионизацией пара.

Дуговые разряды на стенках термоядерных установок интенсивно изучались в 60–80-х годах прошлого столетия [4–11]. В катодных пятнах униполярных дуг выделяется энергия, генерируемая за счет термоЭДС, существующей в пристеночном слое плазмы. Для поддержания в них тока не требуется внешнего источника. В образовании электрических разрядов на стенках термоядерных установок существенную роль играют также индуцированные электрические поля. Обзор ранних экспериментальных и теоретических исследований разрядов приведен в [12]. Более поздний обзор опубликован в [13].

В условиях срыва тока возможно появление униполярных импульсных дуг. Их следы, по-видимому, были обнаружены на диверторной пластине токамака DIII-D [14]. В инерционных униполярных дугах замыкание электрического тока на ту же поверхность обеспечивается поперечным инерционным дрейфом ионов. Ионы сдвигаются в направлении плазменной трубки, опирающейся на катодное пятно, а эквивалентный электронный ток из плазмы уходит на окружающую катодное пятно поверхность. Он выделяет тепловую энергию электронов, находившихся в объеме порядка $\pi\rho_i^2 L$, где L – длина магнитной силовой линии, ρ_i – ларморовский радиус ионов.

Неустойчивость теплообмена между горячей плазмой и поверхностью может быть вызвана термоэлектронной эмиссией в отсутствие тока на стенку. Эмитируемые с температурой поверхности электроны замещаются горячими, поступающими из плазмы. Таким образом, на более нагретые участки поступает больше тепла [15–17]. Развитие этой неустойчивости может приводить к тепловой контракции, т.е. появлению на поверхности горячих пятен [18, 19]. Горячие пятна на поверхностях из вольфрама могут возникать только при срывах тока.

Аналогичная неустойчивость теплообмена между плазмой и поверхностью может иметь место, если часть испарившихся атомов возвращается на стенку в виде ионов, которые приносят бóльшую энергию, чем затрачено на их испарение [20]. Вероятность ионизации возвратного потока

будет высокой, если температура пристеночных электронов составит несколько электрон-вольт. Локализация испарения при тепловой контракции наблюдалась, например, при воздействии плазмы, созданной лазерным импульсом, на алюминиевую мишень [21]. При тепловой контракции удельный поток энергии на более нагретые поверхности должен возрастать за счет поперечного и продольного теплопереноса в плазме.

КАПЕЛЬНАЯ ЭРОЗИЯ

Эрозия стенок в виде капель применительно к установкам с магнитным удержанием плазмы исследовалась во многих работах, например в [22–26]. В проекте ИТЭР при срывах тока допускаются тепловые нагрузки в диверторе до 5 МДж/м^2 при длительности 1–10 мс. В таком диапазоне нагрузок капельно-паровая эрозия была рассчитана в работе [27]. В ней использовалась предложенная ранее расчетно-теоретическая модель [28] применительно к униполярной инерционной дуге для бериллия, ванадия и вольфрама. Распространение границ испарения и плавления материала рассчитывалось при выделении за время τ заданной энергии на поверхности радиусом r. Предполагалось, что к образованию капель приводит течение расплава под действием давления возвратного потока насыщенных паров материала стенки. Движение расплава станет возможным, если сумма давлений отдачи и внешнего больше удерживающего действия сил поверхностного натяжения:

$$P_{\text{отд}} + P > \gamma(T)/h. \qquad (1)$$

Здесь $P_{\text{отд}}$ – давление отдачи, принимаемое, как при испарении в вакууме, 0.55 от давления насыщенного пара; P – внешнее давление; $\gamma(T)$ – поверхностное натяжение при температуре поверхности расплава T; h – толщина расплава. Температура T определялась из баланса выделившейся на поверхности энергии, энергии испарения и энергии, отводимой теплопроводностью. Движение границы расплава рассчитывалось в зависимости от T и времени t по формуле

$$h = K\sqrt{t(\lambda/\rho c)}. \qquad (2)$$

Здесь K – определяемый параметрами задачи численный коэффициент, λ – коэффициент теплопроводности, ρ – плотность, c – теплоемкость расплава. Движение расплава начинается с запаздыванием, время которого находится по формуле (2), и при условии, что толщина расплава больше критической величины, определяемой из равенства (1). В [27] приведены результаты расчетов при следующих режимах: выделяющаяся удельная энергия – 1 МДж/м^2 при $\tau = 1 \times 10^{-3}$ с и 13 МДж/м^2 при $\tau = 1.5 \times 10^{-2}$ с, соответствующие удельные мощности – 1 ГВт/м^2 и 0.9 ГВт/м^2. При первом режиме без внешнего дополнительного давления происходит плавление и испарение поверхности, но движение расплава для всех металлов отсутствует. Для начала движения помимо давления отдачи необходимо внешнее давление для бериллия $P > 3.1 \times 10^4$ Па, для вольфрама $P > 2.6 \times 10^4$ Па. При этом толщина расплавленного слоя вольфрама (10^{-4} м) больше, чем для бериллия (1.3×10^{-5} м), почти на порядок. При втором режиме для вольфрама $P_{\text{отд}} = 1.7 \times 10^5$ Па, время задержки – 11 мкс, глубина расплава – 7.2×10^{-4} м. При движении расплава капельная эрозия может значительно превышать испарение материала, а соотношение долей капельной и паровой эрозии в общем случае существенно зависит от дополнительного давления плазмы. В первом режиме поток испарившихся атомов бериллия приблизительно составляет 1×10^{26} ат/с м^2. В таких режимах возможно развитие указанной выше тепловой контракции, обусловленной ионизацией пара.

В магнитном поле на движение слоя расплавленного вольфрама и образование капель влияет сила Ампера, создаваемая током термоэмиссии [25, 29]. Действие этой силы на пятно расплава устраняет стабилизирующее действие поверхностного натяжения, выражаемое формулой (1). Замыкание тока термоэмиссии через элементы конструкции реактора можно исключить, приложив небольшую (порядка работы выхода электронов) разность потенциалов, запирающую ток.

Интенсивное образование капель вольфрама, описанное в работах [22–24, 30, 31] связано со значительным динамическим давлением потока плазмы, сдувающего поверхностный слой расплава.

В токамаке TEXTOR исследовалась поверхность вольфрамовой пластины, разделенной зазорами 0.5 мм при удельной мощности до 21 МВт/м^2 [26]. Было показано, что зазоры препятствуют движению расплава.

При срывах тока самостоятельной проблемой является эрозия, вызываемая галотоками мегаамперного уровня.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процессы взаимодействия плазмы с поверхностью при значительных удельных нагрузках существенно зависят от таких параметров пристеночной плазмы, как ее состав, плотность и температура, уровень турбулентности и перенос энергии излучением. Из приведенного краткого анализа нетрудно видеть, что проблема эрозии стенок в ИТЭР не может решаться на базе только существующих модельных экспериментальных и расчетно-теоретических исследований. Так как капельная эрозия возникает при движении расплава, эффективным способом ее подавления может

стать нарушение сплошности жидкой пленки, препятствующее ее образованию и движению. Такая возможность эффективного подавления капельной эрозии была обнаружена в работах [32, 33]. В них определялась эрозия анодов из ванадия в полностью ионизованной литиевой плазме в импульсных разрядах при килоамперных токах и длительности порядка миллисекунды. Для сплошного анода из мелкозернистого ванадия капельная эрозия была порядка 1×10^{-3} г на 1 кулон с размерами капель 1–100 мкм [32]. При использовании анода из пористого ванадия с размерами пор 35–45 мкм эрозия оказалась около 1×10^{-6} г/Кл, т.е. на три порядка меньше, чем на сплошном аноде [33]. Она определялась по потере веса анода после прохождения суммарного заряда в 1000 Кл. Наличие пор препятствовало образованию сплошной жидкой пленки, наблюдались только оплавления головок зерен.

По мнению авторов, следует экспериментально проверить такой способ подавления капельной эрозии диверторных пластин с нанесенным на них слоем из пористого вольфрама.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hender T.C., Wesley J.C., Bialek J. et al.* Progress in the ITER Physics Basis // Nucl. Fusion. 2007. V. 47. P. 128.
2. *Roth J., Tsitrone E., Loarte A. et al.* // J. Nucl. Mat. 2009. V. 390–391. P. 1.
3. *Visca E., Escourbiac F., Libera S. et al.* // Fusion Eng. Design. 2009. V. 84. P. 309.
4. *Robson A.E., Thonemann P.C.* // Proc. Phys. Soc. 1959. V. 73. P. 508.
5. *Simonov V.A., Shvilkin B.N., Kutukov G.P.* // Proc. Conf. Salzburg. 1961. Nucl. Fus. Suppl. P1. IAEA. Vienna. 1962. P. 313.
6. *Goodall D.H. J., Conton T.W., Sofield C., McCracken G.M.* // J. Nucl. Mat. 1978. V. 76/77. P. 492.
7. *McCracken G.M., Stott P.E.* // Nucl. Fusion. 1979. V. 19. № 7. P. 889.
8. *Mioduszewski P.* // Comm. Plasma Phys. Contr. Fus. 1980. V. 6. № 1. P. 7.
9. *Höthker K., Bieger W., Hartwig H. et al.* // J. Nucl. Mat. 1980. V. 93/94. P. 785.
10. *Tien J.K., Panayotow N.F., Stevenson R.D., Gross R.A.* // J. Nucl. Mat. 1978. V. 76/77. P. 481.
11. *Schwirzke F., Taylor R.J.* // J. Nucl. Mat. 1980. V. 93/94. P. 780.
12. *Зыкова Н.М., Недоспасов А.В., Петров В.Г.* Униполярные дуги // ТВТ. 1983. Т. 21. № 4. С. 778.
13. *Wolff H.* Atomic and Plasma-Material Interaction Data for Fusion // Supplement to Nuclear Fusion. Vienna: IAEA, 1991. V. 1. P. 79.
14. *Зыкова Н.М., Недоспасов А.В., Сергиенко Г.В. и др.* // Физика плазмы. 1996. Т. 22. № 8. С. 679.
15. *Недоспасов А.В., Петров В.Г.* // ДАН СССР. 1983. Т. 269. Вып. 3. С. 603.
16. *Philipps V., Samm U., Tokar M.Z. et al.* // Nucl. Fusion. 1993. V. 33. P. 953.
17. *Ye M.Y., Takamura S., Ohno N.J.* // Nucl. Mat. 1997. V. 241–243. P. 1243.
18. *Tokar' M.Z., Nedospasov A.V., Yarochkin A.V.* // Nucl. Fusion. 1992. V. 32. P. 15.
19. *Nedospasov A.V., Bezlyudny I.V.* // Contrib. Plasma Phys. 1998. V. 38. № 1/2. P. 337.
20. *Недоспасов А.В., Шелюхаев Б.П.* // ДАН СССР. 1987. Т. 295. № 1. С. 102.
21. *Батенин В.М., Климовский И.И., Кобылянский А.И. и др.* Взаимодействие поверхности с плазмой ее паров после окончания лазерного импульса // ТВТ. 1990. Т. 28. № 6. С. 1093.
22. *Federici G., Zhitlukhin A., Arkhipov N. et al.* // J. Nucl. Mat. 2005. V. 337–339. P. 684.
23. *Zhitlukhin A., Klimov N., Landman I. et al.* // J. Nucl. Mat. 2007. V. 363–365. P. 301.
24. *Климов Н.С., Подковыров В.Л., Житлухин А.М. и др.* // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2009. Вып. 2. С. 52
25. *Sergienko G., Bazylev B., Huber A. et al.* // J. Nucl. Mat. 2007. V. 363–365. P. 96.
26. *Sergienko G., Bazylev B., Hirai T. et al.* // Phys. Scr. 2007. № T128. P. 81.
27. *Стрелкова Г.Г., Недоспасов А.В.* // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2000. Вып. 3. С. 50.
28. *Ганифельд Р.В., Стрелкова Г.Г.* // Доповіді НАН Україні. 2000. № 4. С. 78.
29. *Sergienko G., Huber A., Kreter A. et al.* In: 32nd EPS Conf. on Plasma Physics and Controlled Fusion. Tarragona. Spain. 2005. ECA 29C. P-1.018.
30. *Bazylev B., Janeschitz G., Landman I. et al.* // Fusion Eng. Design. 2008. V. 83. P. 1077.
31. *Bazylev B., Janeschitz G., Landman I. et al.* // Fusion Eng. Design. 2009. V. 84. P. 441.
32. *Nedospasov A.V., Sergienko G.V., Zykova N.M. et al.* // J. Nucl. Mater. 1999. V. 266–269. P. 618.
33. *Zhmendak A.V., Huber A., Kvitcinskiy V.A. et al.* // J. Nucl. Mater. 2001. V. 290–293. P. 220.