

**In-situ изучение эрозии вольфрама при импульсном тепловом воздействии
мощного электронного пучка**

*А.А. Васильев^{1,2}, А.С. Аракчеев^{1,2,3}, В.А. Батаев³, И.А. Батаев³, А.В. Бурдаков^{1,3},
Л.Н. Вячеславов^{1,2}, И.В. Кандауров¹, А.А. Касатов^{1,2}, В.В. Куркучев^{1,2}, К.И. Меклер¹,
В.А. Попов^{1,2}, Ю.А. Трунев^{1,2}*

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

²Новосибирский государственный университет

³Новосибирский государственный технический университет

Мощные выбросы плазмы в ловушках с магнитным удержанием реакторных размеров приводят к интенсивным импульсным тепловым нагрузкам на материалы первой стенки (до 10 МДж/м²) [1]. В качестве плазмоприемника диверторной зоны экспериментального токамака-реактора ITER был выбран вольфрам из-за его низкой нейтронной активации, низкого накопления трития и высоких температуры плавления и теплопроводности. При подобных условиях происходит сильная эрозия поверхности металла, приводящая к повреждению конструкции, а также образованию большого количества микрочастиц вольфрама, которые влияют на удержание горячей плазмы и представляют проблему для радиационной безопасности.

Параметры ожидаемых в термоядерном реакторе импульсных тепловых нагрузок на первую стенку являются недостижимыми для современных плазменных ловушек, поэтому для экспериментального моделирования теплового воздействия плазмы на материалы используются испытательные стенды различных типов: плазменные ускорители, инжекторы пучков электронов и лазеры. Для этих исследований в ИЯФ СО РАН был разработан специализированный стенд, оснащенный мощным длинноимпульсным инжектором электронов с плазменным эмиттером, а также портами для оптических диагностик. На установке может быть получен пучок электронов с полным током 40 – 80 А, энергией частиц до 110 кэВ и длительностью импульса до 300 мкс [2]. Адиабатическое сжатие пучка в сходящемся магнитном поле позволяет получить тепловую нагрузку на мишени с гауссовым профилем с максимумом в центре до 25 ГВт/м² и шириной на полувысоте до 10 мм. Калориметрические измерения показали поглощение энергии падающего пучка ~60% в широком диапазоне рабочих режимов. Электронный пучок не создает сильного фонового свечения, что позволяет использовать различные оптические техники для диагностики разрушения материала.

Установка оснащена комплексом in-situ оптических диагностик эрозии поверхности и абляционного факела. Двумерная картина теплового излучения поверхности образца регистрируется при помощи системы из четырех скоростных фотокамер в ближней инфракрасной области, что позволяет получить динамику распределения температуры мишени в ходе облучения электронным пучком в различные моменты времени. Также тепловое излучение с нескольких точек поверхности собирается линейкой световодов и регистрируется лавинными

фотодиодами и высокоскоростным АЦП непосредственно во время импульсного нагрева. Быстрая съемка поверхности в свете непрерывного лазера ($\lambda=532$ нм) с использованием узкополосного фильтра применяется для изучения процессов плавления. Фотосъемка разлетающихся микрочастиц производится по направлению вдоль поверхности мишени начиная с ~ 20 мкс спустя после работы электронного инжектора. Для получения временной динамики генерации микрочастиц применяется техника рассеяния света непрерывного лазера на малые углы. Луч лазера проходит на расстоянии ~ 7 мм от поверхности мишени вдоль нее, при этом рассеянное на частицах вольфрама излучение собирается в три канала, соответствующих разным углам рассеяния, и регистрируется при помощи ФЭУ.

Изучение эрозии вольфрамовых пластин производилось при нагрузке около и выше порога плавления (~ 50 МДж $\text{м}^{-2}\text{с}^{-0.5}$) при начальной комнатной температуре мишени. Характерная сеть неоднородностей в тепловом излучении появляется после первого импульса и становится более плотной и выраженной с последующими тепловыми нагрузками. Повышение локальной температуры поверхности наблюдалось около краев трещин, где также было обнаружено распространение трещин вдоль поверхности вглубь материала. Было показано существование горячих областей с превышением температуры на 500 К над соседними участками нагреваемой поверхности в течении более чем 5 мс после окончания нагрева. Было обнаружено существование расплава на краях трещин при помощи съемки с лазерной подсветкой. При тепловой нагрузке существенно выше порога плавления наблюдалось движение расплава во время нагрева и вращение общей картины неоднородностей от импульса к импульсу. Быстрая съемка вылетающих с поверхности микрочастиц позволила определить их скорости по длине треков за время экспозиции. Анализ треков показал, что скорость частиц линейно зависит от расстояния от мишени, что подтверждает гипотезу о малой продолжительности времени генерации капель, происходящей в конце импульса. Из сравнения сигналов различных каналов лазерного рассеяния на малый угол была получена зависимость размера микрочастиц от времени их прохождения через область занятую лазерным пучком. Исходя из интегрального уровня сигнала рассеянного излучения был определен порог интенсивной генерации микрочастиц, который составил ~ 200 МДж $\text{м}^{-2}\text{с}^{-0.5}$.

Работа на экспериментальном стенде поддерживается Российским Научным Фондом (проект № 14-50-00080). Изучение эрозии вольфрама частично поддерживается РФФИ, исследовательский проект № 15-32-20669.

Литература

1. A. Loarte [et al.]. Transient heat loads in current fusion experiments, extrapolation to ITER and consequences for its operation // Phys. Scr. 2007 T128, P. 222–228
2. V.V. Kurkuchekov [et al.]. Novel Injector of Intense Long Pulse Electron Beam for Linear Plasma Devices // Fusion Sci. and Technol. 2013 V. 63, N.1T P. 292-294