

МЕТОДИКИ ТЕСТИРОВАНИЯ ОБРАЩЕННЫХ К ПЛАЗМЕ ЭЛЕМЕНТОВ ТЯР

В конце 2013 года было принято окончательное решение о полностью вольфрамовом диверторе ИТЭРа. Уже разработана техническая документация на облицовочные элементы дивертора и методику испытаний диверторных сборок [1]. На первом этапе испытываются малогабаритные сборки (рис. 1), на втором этапе должна быть продемонстрирована осуществимость производства полномасштабных обращенных к плазме элементов дивертора и их соответствие требованиям ИТЭР. Национальные агентства должны изготовить макет размером не менее половины вертикального элемента мишени дивертора, и наглядно показать, что он проходит тест тепловой нагрузкой. Этот тест должен быть проведен в установке по тестированию элементов дивертора в НИИЭФА.

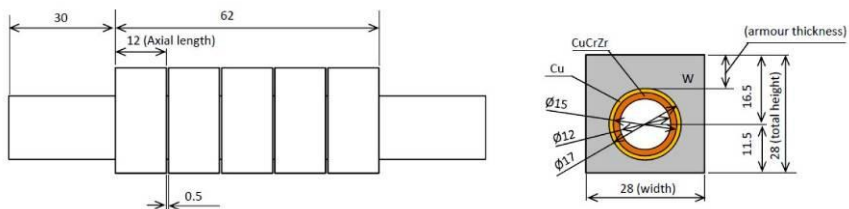


Рис.1 – Малогабаритная вольфрамовая сборка для испытаний элементов дивертора [1]

Процедура тестирования включает:

- составление исходной температурной карты поверхности при стационарной нагрузке 5 МВт/м^2 ;
- 7000 циклов с мощностью теплового потока 10 МВт/м^2 (типичное значение длительности импульса 10 с, скважность 1);
- 400 циклов с мощностью теплового потока 20 МВт/м^2 (типичное значение длительности импульса 10 с, скважность 1);
- составление температурной карты поверхности после термоциклирования при стационарной нагрузке 5 МВт/м^2 .

При тестировании интенсивными тепловыми потоками облучаемая поверхность должна составлять не менее 80% для малоразмерной сборки, не менее 50% для полномасштабной вертикальной мишени. Эта процедура основывается на данных по ожидаемым тепловым нагрузкам в диверторе ИТЭР [2].

В настоящее время проводятся обширные испытания малогабаритных вольфрамовыхборок в Европе, готовятся к проведению таких работ в Японии и Корее. Продемонстрирована хорошая стойкость вольфрамовых элементов при нагрузке 10 МВт/м^2 , но при 20 МВт/м^2 наблюдалась деградация, хотя в большинстве случаев и не фатальная [3, 4]. Отдельный интерес представляют исследования работоспособности элементов, испытавших повышенные нагрузки, например в работе [5] приведены данные по термоциклированию образцов после облучения импульсными потоками плазмы, демонстрирующие повышенную деградацию элементов.

В проведенных нами исследованиях определялся характер эрозии вольфрамового образца с предварительным повреждением, имитирующим воздействие срыва, под воздействием умеренных потоков плазмы и циклических температурных нагрузок, соответствующих ЭЛМа малой мощности. Образец был предоставлен ГНЦ РФ ТРИНИТИ, предварительно он был облучен в плазменном ускорителе КСПУ.

Циклическая тепловая нагрузка на образец осуществлялась варьированием мощности электронного пучка в пучково-плазменном разряде в водороде. Ускоряющее напряжение электронной пушки изменялось в диапазоне $1,5 - 7,4 \text{ кВ}$, так что температура поверхности образца, контролируемая термопарой, менялась от 50 до $450 \text{ }^\circ\text{C}$. Форма импульсов температуры псевдо треугольная, длительность 10 с , скважность единица, всего было проведено 240 циклов нагрева и охлаждения. Максимальная используемая мощность электронного пучка составляла $2,5 \text{ кВт}$, что давало плотность мощности на поверхности мишени 20 МВт/м^2 .

В результате термоциклирования поверхность в центре образца была расплавлена (рис. 2). Размер расплавленной области в несколько раз меньше области облучения (площадь расплава $0,25 \text{ см}^2$). Расплавление произошло в 236 цикле, после чего было сделано еще 4 цикла. Причиной этого расплавления могло послужить локальное расплавление небольшой отслоившейся чешуйки, вызвавшее повышение давления и переход разряда в дуговой режим с концентрацией вблизи оси. При этом вся мощность выделяется на небольшой площади (плотность мощности в пятне достигает 70 МВт/м^2).



Рис. 2 Внешний вид вольфрамового образца после термоциклирования

Проведенные расчеты тепловой нагрузки в программе Comsol показали, что температура в пятне в дуговом режиме должна повышаться до 2200 °С, чего недостаточно для расплавления вольфрама (температура плавления 3380 °С). Оплавление в нашем случае можно объяснить сильным снижением теплопроводности образца из-за растрескивания его поверхности. С эффектом снижения теплопроводности можно связать и рекристаллизацию облучаемой поверхности образца, которой не должно было происходить в расчетных режимах.

Исследование образца на электронном микроскопе показало рекристаллизацию и появление сети мелких трещин (рис. 3), выкрашивание поверхности образца (рис. 4). Трещины на боковой поверхности образца достигают глубины 2 – 4 мм, рекристаллизация заметна на глубину до 1,5 мм, также хорошо видно выкрашивание по ребрам (рис. 3).

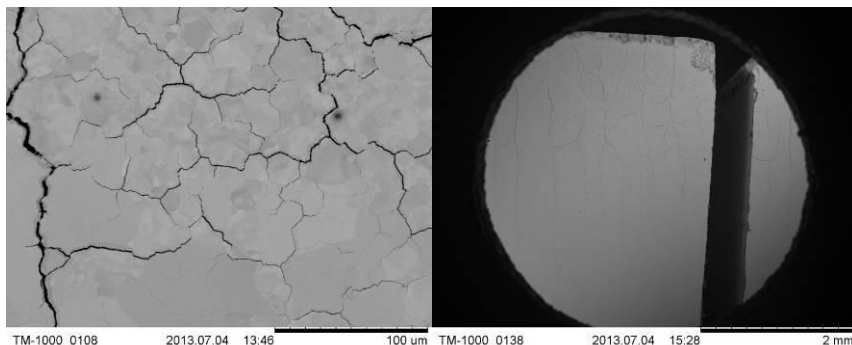


Рис. 3 Поверхность образца – рекристаллизация и трещины

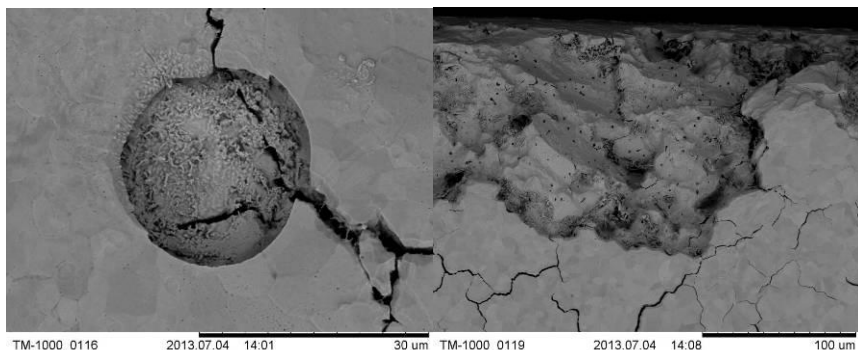


Рис. 4 Выкрашивание образца

Циклические тепловые нагрузки приводят к растрескиванию, рекристаллизации и интенсивному выкрашиванию материала. Результатом этих изменений становится плавление материала в тех условиях, при которых оно не должно происходить с материалом в исходном состоянии. 240 циклов по 10 секунд с максимумом мощности 20 МВт/м^2 стало достаточно для рекристаллизации образца на глубину до 1,5 мм и расплавлению части поверхностного слоя. В условиях неповрежденного образца такая нагрузка не должна была приводить даже к рекристаллизации поверхности.

По результатам исследования можно сделать вывод о потере изначальной стойкости вольфрама после срыва, что приводит к разрушению материала даже в относительно щадящих условиях.

Работа выполнена в рамках госконтракта №Н.4х.44.90.13.1105 по заказу госкорпорации «Росатом».

- [1] T. Hirai, F. Escourbiac, S. Carpentier-Chouchana, A. Fedosov, L. Ferrand, T. Jokinen et al., *Fusion Engineering and Design* 88 (2013) 1798–1801.
- [2] R.A. Pitts, A. Kukushkin, A. Loarte, A. Martin, M. Merola, C.E. Kessel et al., *Physica Scripta*, T 138 (2009) 014001.
- [3] G. Pintsuk, I. Bobin-Vastra, S. Constans, P. Gavila, M. Rodig, B. Riccardi, *Fusion Engineering and Design* 88 (2013) 1858–1861.
- [4] E. Visca, E. Cacciotti, A. Komarov, S. Libera, N. Litunovsky, A. Makhankov et al., *Fusion Engineering and Design* 86 (2011) 1591–1594.
- [5] N.S. Klimov, V.L. Podkovyrov, D.V. Kovalenko, A.M. Zhitlukhin, V.A. Barsuk, I.V. Mazul et al., *Phys. Scr.* T145 (2011) 014064.