

Р.А. СЕЛИВАНОВ<sup>1</sup>, И.А. СОРОКИН<sup>1,2</sup>, С.А. КРАТ<sup>1\*</sup>, Н.С. СЕРГЕЕВ<sup>1,3</sup>, Д.В. КОЛОДКО<sup>1,2</sup>, Ф.С. ПОДОЛЯКО<sup>1</sup>, Е.А. ФЕФЕЛОВА<sup>1</sup>, О.В. ВОЛКОВА<sup>4</sup>, В.В. ЗАХАРОВ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

<sup>2</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Россия, Фрязино Московской обл.

<sup>3</sup>Национальный исследовательский институт «Курчатовский институт», Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

<sup>4</sup>Институт высокотемпературной электрохимии Уро РАН, Россия, Екатеринбург  
\*stepan.krat@gmail.com

## **ИССЛЕДОВАНИЕ БОР-ЛИТИЕВОГО КОМПОЗИТА ПОД ДЕЙСТВИЕМ МОЩНЫХ ТЕПЛОВЫХ И ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ НАГРУЗОК**

Выбор материала обращённых к плазме элементов (ОПЭ) термоядерной установки – ключевой вопрос, определяющий её работоспособность. Одним из перспективных материалов является литий, использование которого предполагается в рамках концепции жидкометаллической стенки термоядерной установки. Преимущества лития по сравнению с другими материалами состоят в его минимально возможном атомном номере ( $Z=3$ ), хорошей совместимости с водородной плазмой, низкой энергией ионизации, широким диапазоном температур, в котором он может применяться (от температуры плавления  $\sim 180$  °С до  $\sim 1000$  °С). Эксперименты на токамаках с жидколитиевыми ОПЭ показали положительные эффекты применения лития на термоядерную плазму (уменьшение водородного рециклинга, уменьшение эффективного заряда плазмы, подавление нестабильностей). Из всех существующих технологических решений, связанных с применением лития, наиболее развитым является использование капиллярно-пористых систем (КПС), наполненных литием, в качестве ОПЭ. При соблюдении условия хорошей смачиваемости, правильном выборе материала и конструкции матрицы, КПС с жидким литием способны выдерживать тепловые нагрузки  $\sim 10$  МВт/м<sup>2</sup>. К недостаткам существующих КПС следует отнести сложность в их обслуживании, невозможность ремонта в случае локального разрушения матрицы, например в случае локального истощения лития, большой атомный номер тугоплавких металлов, используемых в качестве материала матрицы.

С точки зрения КПС как ОПЭ, оптимальным является материал матрицы с малым атомным номером, хорошо совместимый с термоядерной плазмой, хорошо смачиваемый литием, и лёгкий в обработке.

Бор-литиевый композит (БЛК) представляет собой матрицу бориды лития  $\text{Li}_7\text{B}_6$ , заполненную металлическим литием. Массовый состав БЛК:  $\sim 80 \pm 4$  мас.% Li,  $\sim 20 \pm 4$  мас.% В. БЛК применяется в качестве материала анодов химических источников тока, работающих при высоких температурах  $\sim 500$ - $600$  °С, т.к. обладает высоким коэффициентом адгезии лития в матрице бориды, что обеспечивает высокой пластичностью и легкую механическую обработку материала, при этом физико-химические свойства лития не претерпевают изменения. БЛК сохраняет свои механические свойства до температуры  $\sim 800$ °С. Всё это делает БЛК материалом, потенциально перспективным для использования в ОПЭ менее нагруженных элементов первой стенки токамаков с литиевыми элементами.

Были проведены первые испытания образцов БЛК как материала ОПЭ под тепловой нагрузкой электронным пучком и плазменной нагрузкой гелиевой плазмы. Испытания проводились на установке ПР-2 с пучково-плазменным разрядом. В качестве образцов использовались БЛК  $\sim 25 \times 25 \times 5$  мм без активного охлаждения. Во время испытаний проводилась ИК-термометрия поверхности образца, измерение температуры обращённой к плазме/электронному пучку поверхности и задней поверхности образца, а также измерение параметров плазмы при помощи зонда Ленгмюра, масс-спектропии ионных потоков и обзорной оптической спектроскопии. Поверхность БЛК изучалась до и после испытаний при помощи сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионной спектроскопии. Для более подробного изучения структуры БЛК были проведены дополнительные исследования, в которых литий был выпарен из БЛК путём его нагрева до  $\sim 500$  °С в вакууме радиационным нагревателем и длительной выдержки.

Было установлено, что БЛК после выпаривания из него лития в вакууме представляет собой разупорядочено переплетённые волокна бориды лития. Толщина волокон составляет  $\sim 1$  мкм, длина более 50 мкм, характерное расстояние между волокнами  $\sim 5$  мкм. Стоит отметить, что после выпаривания лития объём БЛК увеличился в  $\sim 3$  раза, поэтому можно ожидать, что изначально расстояние между волокнами меньше наблюдаемого.

Испытания БЛК под действием электронного пучка проводились с пучком диаметром 30 мм при остаточном давлении  $5 \times 10^{-6}$  мбар и максимальной мощности теплового потока 1 МВт/м<sup>2</sup> (при фиксированной энергии электронного пучка - 4 кэВ). Во время испытаний мощность теплового потока варьировалась с помощью тока эмиссии электронной пушки ступенчато с фиксированным шагом. После каждого увеличения мощности достигалось

стационарное состояние температуры обращенной к пучку поверхности образца с помощью одной из установленных на держателе термопар.

В ходе испытаний БЛК под нагрузкой гелиевой плазмы рабочее давление гелия в камере установки составляло 0.01 – 0.02 мбар, мощность разряда варьировалась с помощью настроек электронной пушки (ток эмиссии и ускоряющий потенциал) для монотонного нагрева образца, контролируемого с помощью встроенных термопар. Мощность разряда также как и в тепловых испытаниях БЛК увеличивалась ступенчато с достижением стационарного значения температуры обращенной к плазме поверхности образца. Ионный поток из плазмы, плотность которой лежала в пределах  $(1-5) \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , электронная температура – (2-5) эВ, достигал величины  $\sim 10^{21} \text{ м}^{-2}$ . Энергия ионов из плазмы достигала величины порядка потенциала плазмы ( $\sim 10$  эВ).

Как под действием электронного пучка, так и под действием гелиевой плазмы сохраняется целостность образцов, не наблюдается ярко выраженной капельной фазы. При этом по истощению лития в объеме БЛК наблюдается существенное уменьшение линейных размеров образца БЛК, стягивание матрицы к области воздействия на образец. После облучения наблюдается значительное изменение морфологии поверхности образцов как на макро-, так и на микроскопическом уровне.

Под действием электронного пучка испарения бора из образцов не происходило, что подтверждают масс-анализ ионного потока и оптическая спектроскопия (в спектре преобладают линии атомарного лития 670нм). При воздействии гелиевой плазмы происходит активное распыление бора из БЛК. Об этом свидетельствует то, что в массовом составе ионного потока из плазмы присутствует ярко-выраженная компоненте бора; при этом компоненты лития и его производных вносят заметный вклад в состав ионного потока только при мощностях разряда более 500 Вт.

Таким образом по результатам первых испытаний можно говорить о том, что БЛК может быть перспективен как материал ОПЭ, следует продолжать исследования. Можно ожидать, что при активной подпитке БЛК литием, а также при активном охлаждении поверхности БЛК, например при реализации циркуляции жидкого лития с постоянной температурой в контакте с задней поверхностью БЛК, БЛК способен будет выдерживать высокие стационарные плазменные нагрузки в течение длительного времени без разрушения.