ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЕРЕОСАЖДЕННЫХ СЛОЕВ В ТОКАМАКЕ Т-10 С ГРАФИТОВЫМИ И ВОЛЬФРАМОВЫМИ ЛИМИТЕРАМИ

1Архипов И.И., 1Соколина Г.А., 2Грашин С.А., 2Свечников Н.Ю., 2Станкевич В.Г.

1Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, г. Москва,
 Россия, igor\_arkhipov\_54@mail.ru
2НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, Grashin\_SA@nrcki.ru

Эксплуатация токамака Т-10 (НИЦ «Курчатовский институт») с графитовыми кольцевым и рельсовым лимитерами показала, что в зонах небольших, но длительных тепловых нагрузок 1 – 2 МВт/м2 происходила сильная эрозия и растрескивание графитового материала (МПГ-8) лимитеров. Обнаружено так же разрушение кольцевого лимитера в области выхода пучка ускоренных электронов. Интенсивная эрозия графита приводила к перепылению углеродного материала и образованию переосажденных углеродных слоев. Образование таких слоев вызвано соосаждением атомарного дейтерия, образующегося в плазме во время разряда и атомов углерода или углеводородных радикалов, которые являются продуктами физико-химического распыления горячих графитовых лимитеров. В основном, углеводородные пленки покрывали относительно холодные стенки вакуумной камеры и системы откачки токамака [1].

Изучение физико-химических свойств углеводородных пленок проводилось как для «свободных» пленок, собранных с элементов внутренней поверхности камеры токамака, так и для пленок, осажденных на специальные подложки из кремния, кварца и молибдена. С помощью спектрофотомерии, эллипсометрии, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии детально изучен состав, структура, оптические и электрофизические свойства пленок. Показано, что пленки, образующиеся в токамаке можно разделить на два типа, которые существенно различаются по своим оптическим, электрическим и механическим свойствам. Исследована температурная зависимость электропроводности G(T) этих пленок. Определены значения величин энергий активации проводимости Ea в интервале температур 293 – 550 К. Показано, что G(T) и Ea зависят от типа пленки и определяются параметрами разряда в токамаке [2].

Замена в 2015 году графитовых лимитеров на вольфрамовые и увеличение мощности ЭЦР нагрева плазмы с 2 до 3,5 МВт так же привели к эрозии и повреждению материала лимитеров [3]. Чтобы уменьшить тепловые потоки на стенку токамака Т-10 в камере был установлен дополнительный литиевый лимитер. Перепыленные слои были обнаружены в нижней части вольфрамовых элементов конструкции кольцевого лимитера. Для изучения влияния вольфрама на параметры дейтериевой плазмы, в плазму на специальном держателе вводился образец вольфрама, который являлся фрагментом прототипа защитного покрытия дивертора ИТЕР. На том же держателе были закреплены подложки из кварца и сапфира для сбора напыляемого материала. Обнаруженные переосажденные слои подробно исследованы по составу и структуре. Сделаны выводы о возможном влиянии таких слоев на работу токамака Т-10 и ИТЭР.

Таким образом, сбор, систематизация и изучение физико-химических свойств пленок может дать важную информацию не только о типе и свойствах самих переосажденных слоев, но и о процессах эрозии и распыления, а также параметрах плазменного разряда в токамаке.

Литература

1. Vershkov V.A., Andreev V.F., Grashin S.A. et al., Nucl. Fusion. 51. 2011. 094019. P. 1 – 14.
2. Соколина Г.А. и др., Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2018. Т. 61. Вып. 11. С. 81.
3. Budaev V.P., Martynenko Yu.V., Grashin S.A. et al., Nucl. Mater. and Energy 12 (2017) 418.