

Экранировка поверхности материалов испаренным веществом при воздействии на поверхность плазменных потоков в экспериментах на КСПУ-Т**А. Д. Ярошевская, Н. С. Климов, Д. В. Коваленко, В. А. Барсук, Н. А. Данилина**

Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований

Исследование эффекта экранировки представляет практический интерес для создания термоядерного реактора (ТЯР) на основе токамака, в частности для проекта Международного термоядерного реактора — ИТЭР. В токамаке с реакторными параметрами, обращенных к плазме материалов испытывают многократные интенсивные импульсные нагрузки, длительностью 0,1 – 10 мс и мощностью 1 – 10 ГВт на квадратный метр, ожидаемые во время развития плазменных неустойчивостей. При указанных характеристиках превышает предельный поток энергии, который может быть отведен вглубь материала за счет теплопроводности, что приводит к росту температуры поверхности материала до температуры кипения (сублимации) и формированию перед поверхностью экранирующего слоя из испаренного вещества. Наличие экранирующего слоя может существенно снизить поток энергии на поверхность материала за счет того, что часть энергии плазменного потока будет затрачиваться на увеличение внутренней энергии испаренного вещества с последующей потерей этой энергии на излучение экранирующего слоя и за счет выноса нагретого вещества из зоны взаимодействия. Снижение потока энергии на поверхность, в свою очередь, будет приводить к уменьшению эрозии материала.

В проведенных ранее исследованиях эффекта экранировки применялись плазменные ускорители с длительностью импульса не более 0,25 мс. Наиболее детально свойства экранирующего слоя и его влияния на эрозию материалов было изучено в работах на импульсном плазменном ускорителе МК-200 и его модификациях [1]. Эксперименты проводились при длительности плазменного потока 50 мкс и тепловых нагрузках в диапазоне 0,1 – 15 МДж/м². Основным недостатком работ проведенных на импульсных плазменных ускорителях, является слишком короткая длительность (50 мкс для МК-200) по сравнению с ожидаемыми в ТЯР (длительности до 10 мс). В экспериментах на импульсных плазменных ускорителях не удается обеспечить стационарность процесса, взаимодействие плазмы с поверхностью носит импульсный характер с сильно меняющимися за время импульса параметрами плазмы и тепловой нагрузкой, что затрудняет анализ экспериментальных данных и сопоставление с расчетными моделями. Экспериментальные исследования при больших длительностях импульса проводились, но носили ограниченный характер. В тоже время ряд экспериментов по исследованию эрозии материалов при длительностях до 0,5 мс указывают на существенную роль эффекта при достаточно больших тепловых потоках. В частности при исследовании углеродно-волоконистого композита (CFC) показано, что отношение измеренной скорости эрозии к расчетной скорости испарения падает с 1,0 до 0,2 в интервале тепловой нагрузки 0,8 – 1,5 МДж/м² [2]. Аналогичный результат был получен в экспериментах с графитом МПГ-6 [3] и висмутом [4].

Задачей планируемых экспериментов является установить зависимость эффективности экранировки от параметров плазменно-теплого воздействия (длительность, плотность энергии) и свойств облучаемого материала. Для этого будут проведены эксперименты с применением плазменного ускорителя КСПУ-Т (ГНЦ РФ ТРИНИТИ), который позволяет варьировать длительность плазменного потока в диапазоне 0,2 – 1,0 мс и создавать тепловую нагрузку на поверхность материала в диапазоне 0,5 – 5 МДж/м². Схема питания ускорителя обеспечивает трапецевидную форму импульса, положительной особенностью которого является наличие короткого переднего фронта и протяженной области (до 0,8 мс) со слабо меняющимися во времени параметрами, где обеспечиваются стационарные условия плазменного облучения. При взаимодействии плазменного потока КСПУ-Т с плоскими мишенями вблизи оси потока имеется область диаметром 1 – 2 см со слабо меняющимися вдоль поверхности мишени параметрами плазменного теплового воздействия (тепловая нагрузка, давление плазмы). Таким образом, на КСПУ-Т оказывается возможной такая постановка эксперимента, при которой имеет место

однородность условий во времени и вдоль поверхности облучаемого материала. Эти два условия позволяют использовать для анализа экспериментальных данных одномерные численные модели.

Эксперименты по изучению эффекта экранировки на КСПУ-Т предполагается проводить по следующей схеме. Из набора исследуемых твердотельных материалов будут изготовлены плоские мишени, каждая из которых имеет изолированную центральную часть с габаритами, не выходящими за границы центральной области со слабо меняющимися вдоль поверхности мишени параметрами. Термопары, позволят измерить поглощенную материалом энергию. Производить оценку количества испаренного материала и энергии, затраченной на испарение можно по потерям массы центральной части мишени. Поглощенная материалом энергия и энергия, затраченная на испарение — два ключевых параметра, позволяющих определить эффективность экранировки. Первый из них от эффективности экранировки не зависит, а второй будет иметь максимальное значение при отсутствии экранировки, и падать с ростом ее эффективности, при этом будет снижаться и полная энергия, приходящая на поверхность, представляющая собой сумму поглощенной энергии и энергии, затраченной на испарение. Максимальное значение энергии, затрачиваемой на испарение, которое имеет место при отсутствии эффекта экранировки, можно рассчитать численно по величине поглощенной материалом энергии, с которой оно связано однозначно (при фиксированной форме теплового импульса). В работе такие расчеты, будут выполнены за счет численного решения одномерного уравнения теплопроводности в материале, при заданных характеристиках теплового потока на поверхности, с учетом зависимостей теплофизических характеристик материалов от температуры и затрат энергии на фазовые переходы. В результате сопоставления расчетной энергии, затраченной на испарения при отсутствии экранировки, и измеренной в эксперименте будет определяться коэффициент экранировки.

На приведенном графике представлены результаты определения коэффициента экранировки, выполненные по описанной методике, для трех материалов с которыми на КСПУ-Т проводились эксперименты по измерению их эрозии.



Максимальные значения коэффициента экранировки были получены для висмута — элемента с высоким атомным номером ($N = 83$). Для материалов на основе углерода ($N = 6$) коэффициент экранировки существенно ниже даже при более высоких значениях тепловой нагрузки. Экспериментальные результаты указывают на то, что эффективность экранировки зависит не только от атомного номера элемент, но и теплопроводности материала, чем объясняется различие в эффективности экранировки графита и углеродно-волоконистого композита.

Литература

1. Сафронов В.М. Комплексные исследования физических процессов при взаимодействии мощных потоков плазмы с материалами термоядерных установок // диссертация ... д-ра физ.-мат. наук: 29.10.2012. Троицк. 2012. 245 с.
2. Климов Н.С. Макроскопическая эрозия материалов при их облучении интенсивными потоками плазмы // диссертация ... канд. физ.-мат. наук: 28.10.2011. Троицк. 2011. С. 144-149.
3. Путрик А.Б. Продукты эрозии материалов, образующиеся при воздействии интенсивных импульсных потоков плазмы, и захват изотопов водорода в них // диссертация ... канд. физ.-мат. наук. М. 2014. С. 88-96.
4. Klimov N., Barsuk V., Yaroshevskaya A. [et. al] Experimental study of cracks formation on the pure tungsten and the tungsten, which is covered by layer of Be-like materials, under plasma heat loads relevant to ITER transient plasma events // ICFRM-17. Germany. 2015.