**Численное моделирование поведения вольфрама с покрытием карбида бора при воздействии интенсивных потоков плазмы**

***Фомичева С.Ю.1, Алябьев И.А.1, Бирюлин Е.З.1, Лущиков А.Ю.1, Позняк И.М.2, Цыбенко В.Ю.2***

1студент, 2сотрудник

АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Троицк, Россия
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), физтех-школа физики и исследований им. Ландау, Москва, Россия

E-mail: fomicheva.siu@phystech.edu

Одной из ключевых задач при разработке токамака-реактора ИТЭР является выбор материалов для защитных покрытий вакуумной камеры. Материалы-кандидаты должны демонстрировать низкую скорость эрозии в условиях интенсивных плазменно-тепловых воздействий, ожидаемых при работе токамака-реактора. Необходимо свести к минимуму уровень радиологического загрязнения вследствие захвата трития и наведенной радиоактивности, а также химического – из-за возможной токсичности самого материала или продуктов его эрозии. Поступающие от стенки из-за испарения и распыления примеси не должны препятствовать достижению требуемых параметров термоядерной плазмы.

Длительное время в качестве материала для первой стенки ИТЭР предполагалось использовать бериллий, а для облицовки дивертора – вольфрам. Однако, в 2024 году организации ИТЭР принято решение использовать вольфрам для облицовки всей вакуумной камеры, из-за опасений, связанных с токсичностью пыли бериллия.

Вольфрам выбран в качестве облицовочного материала для защитных покрытий вакуумной камеры токамака-реактора ИТЭР благодаря высокой теплопроводности и наибольшей среди металлов температуре плавления (3695 K), что обеспечивает малую скорость эрозии.[3] Однако вольфрам не является идеальным материалом: его сложно обрабатывать, он растрескивается при облучении плазмой при температурах ниже границы хрупко-пластичного перехода, что снижает теплопроводность и приводит к выбросу частиц в камеру. Во время переходных процессов возможно расплавление поверхностного слоя покрытия с инжекцией капель в вакуум. Из-за высокого атомного номера (Z) содержание примесей вольфрама в плазме должно быть строго ограничено (≤10⁻⁵ от её плотности)[1], и сложность достижения этого уровня вообще ставит вопрос о возможности применения вольфрама в качестве материала для первой стенки.

В настоящее время в качестве одного из возможных решений данной проблемы рассматривается нанесение термостойких керамических покрытий на вольфрам, с возможностью быстрого возобновления. В качестве перспективного варианта предлагается покрытие карбида бора B4C толщиной от нескольких микрон до миллиметра. Но перед тем, как использовать данное решение для ИТЭР, необходимо провести исследования покрытия. На базе нашего научного института проводятся испытания вольфрама с покрытием карбида бора на плазменном ускорителе КСПУ. Для выбора наилучших параметров облучения нам было необходимо предварительно провести численное моделирование.

В данной работе представлена расчетная модель, описывающая поведение вольфрама с покрытием карбида бора при воздействии плазменно-теплового потока. В модели решается уравнение теплопроводности

$$\begin{array}{c}ρC\_{p}^{eq}\frac{∂T}{∂t}-∇∙\left(k∇T\right)=Q\#\left(1\right)\end{array}$$

где ρ — плотность. кг/м3 ; $C\_{p}^{eq}$ — «эквивалентная» удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К) [2]; k — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); T — температура, К; t — время, с; Q — функция источников тепла, Вт/м3 . Полагаем, что объёмных источников тепла нет — $Q=0$

Тепловой поток на границе мишени описывается формулой *w = we + wv + wr*, где *we* — поток мощности от плазменного ускорителя, *wv* — поток мощности, уносимый материалом при испарении, Вт/м2 ; *wr* — поток мощности излучения с поверхности, Вт/м2. Задняя поверхность мишени считается теплоизолированной. Начальная температура всех материалов 300 К, задача решается в одномерной постановке. Свойства материала, такие как: теплоемкость, теплопроводность, плотность в модели зависят от температуры, вблизи фазового перехода зависимости моделировались сглаженной функцией Хэвисайда. Для моделирования самого фазового перехода использовался метод эквивалентной теплоемкости[2]. Также в модели учтены испарение и потеря массы вещества. Для описания этого процесса использовалось соотношение Герца-Ленгмюра[4].

Проведено моделирование в широком диапазоне тепловых нагрузок (по фактору теплового воздействия от 9 до 185 МДж/м2с0.5) при разных длительностях импульса (1, 2.2, 300 мс) и разных толщинах покрытия (50 мкм и 1 мм). В результате были получены значения максимальной температуры на поверхности карбида бора и максимальной температуры вольфрама при разных тепловых нагрузках. Сделаны выводы о защитных свойствах покрытия карбида бора и проведено сравнение этих свойств для разных толщин покрытия. Получено распределение температуры вглубь образца, по которому оценена глубина проникновения тепловой волны за время плазменного воздействия. Кроме того, получены значения толщины испаренного слоя при разных тепловых воздействиях. На основе этих данных сделаны выводы о прочности и ресурсе покрытия.

В дальнейшем планируется проведение эксперимента на установке КСПУ (ТРИНИТИ). Результаты моделирования помогут выбрать режимы облучения и определить программу испытаний. Кроме того, полученные экспериментальные данные помогут верифицировать модель.

**Литература**

1. Позняк И.М. [и др.]. Поведение вольфрама с покрытием из карбида бора при воздействии интенсивных плазменных потоков// ВАНТ Сер. Термоядерный синтез. 2024. Т. 47. №1. С. 99-110.
2. Hu H., Argyropoulos A.S. Mathematical modelling of solidification and melting: a review. — Modelling Simul. Mater. Sci. Eng., 1996, vol. 4, p. 371—396.
3. Pitts R.A., Coad J.P., Coster D.P. et al. Material erosion and migration in tokamaks. — Plasma Physics and Controlled Fusion, 2005, vol. 47, № 1 2B, p. B303—B322.
4. Samokhin A.A. Effect of Laser Radiation on Absorbing Condensed Matter ed V.B. Fedorov // New York: Nova Science Publishers, 1990.