

XXII КОНФЕРЕНЦИЯ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ

Москва, НИЯУ МИФИ, 23-24 января 2019 г.

Сборник научных трудов

**Москва
2019**

Министерство науки и высшего образования РФ
Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»

**МАТЕРИАЛЫ
XXII КОНФЕРЕНЦИИ**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Москва, НИЯУ МИФИ, 23-24 января 2019 г.

Москва
2019

ББК 22.333
УДК 533.9 (06)
В 40

Материалы XXII конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью». Москва, 23-24 января 2019 г.
М.: НИЯУ МИФИ, 2019 г., 140 с.

Сборник содержит материалы докладов, представленных на ежегодно проводимую в НИЯУ МИФИ 22-ю конференцию по взаимодействию плазмы с поверхностью. Тематика конференции охватывает экспериментальные и теоретические исследования взаимодействия плазмы с поверхностью в установках управляемого термоядерного синтеза. Сборник сформирован по мере поступления докладов, которые опубликованы в авторской редакции при минимальной редакционной правке.

Редакционная коллегия:

*В.А. Курнаев,
Ю.М. Гаспарян,
М.И. Шутикова*

ISBN 978-5-7262-2542-5

© Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ», 2019

Н.Н. ЧЕРЕНДА¹, В.И. ШИМАНСКИЙ¹, В.В. УГЛОВ¹,
В.М. АСТАШИНСКИЙ², А.М. КУЗЬМИЦКИЙ²

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

²Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,
Минск, Беларусь

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЦИРКОНИЯ, ПОДВЕРГНУТОГО ВОЗДЕЙСТВИЮ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

Цирконий и его сплавы широко применяются в ядерной энергетике, в первую очередь, благодаря своим ядерно-физическим свойствам. Одной из проблем, возникающих при использовании циркония в водород-содержащих средах является его наводороживание и охрупчивание [1]. Подходом к решению этой проблемы может быть формирование пассивирующего поверхностного оксида циркония, затрудняющего диффузию водорода в поверхностном слое. В работе [1] показано, что присутствие дополнительных легирующих элементов в оксиде циркония влияет на диффузионную подвижность водорода в оксиде циркония. Таким образом, формирование поверхностного оксида, легированного дополнительными элементами, может повысить коррозионную стойкость циркония и его сплавов. Концентрированные потоки частиц эффективно используются для легирования поверхностного слоя материалов. Легирование осуществляется путем нанесения пленки или покрытия легирующего элемента на поверхность материала и последующего их перемешивания при последующем высокоэнергетическом воздействии. При использовании режимов воздействия, приводящих к плавлению, основным механизмом формирования легированного слоя является конвективный массоперенос в жидкости. Однородность перемешивания компонентов покрытия и подложки будет увеличиваться с ростом длительности существования расплава. Особый интерес в этом отношении представляют компрессионные плазменные потоки (КПП), генерируемые квазистационарными плазменными ускорителями, с относительно большой длительностью импульса ~ 100 мкс [2]. Целью данной работы являлось предварительное исследование структурно-фазового состояния поверхностного слоя циркония, подвергнутого воздействию компрессионных плазменных потоков.

Объектом исследований являлись образцы чистого циркония (концентрация гафния не превышала 0.1 ат.%). Обработку образцов на магнитоплазменном компрессоре компактной геометрии осуществляли 3

импульсами. Эксперименты проводили в режиме “остаточного газа”, при котором предварительно откачанную вакуумную камеру МПК заполняли рабочим газом – азотом до давления 400 Па. Расстояние между образцом и срезом центрального электрода варьировалось в диапазоне 6-14 см, что обеспечивало примерное изменение плотности энергии теплового потока, поглощенной поверхностью, 40-13 Дж/см² за импульс. Структурно-фазовое состояние поверхностного слоя исследовалось методом рентгеноструктурного анализа с помощью дифрактометра Rigaku Ultima IV в излучении CuK α в фокусировке параллельных пучков. Изменение массы образцов определялось на аналитических весах RADWAG AS 60/220/C/2/N. Погрешность определения массы образца составляла 0,05 мг.

Результаты анализа структурно-фазового состояния поверхностного слоя образцов до и после воздействия КПП представлены на рисунке 1. Основные изменения структурно-фазового состояния связаны с взаимодействием атомов плазмообразующего газа – азота с атомами поверхности.

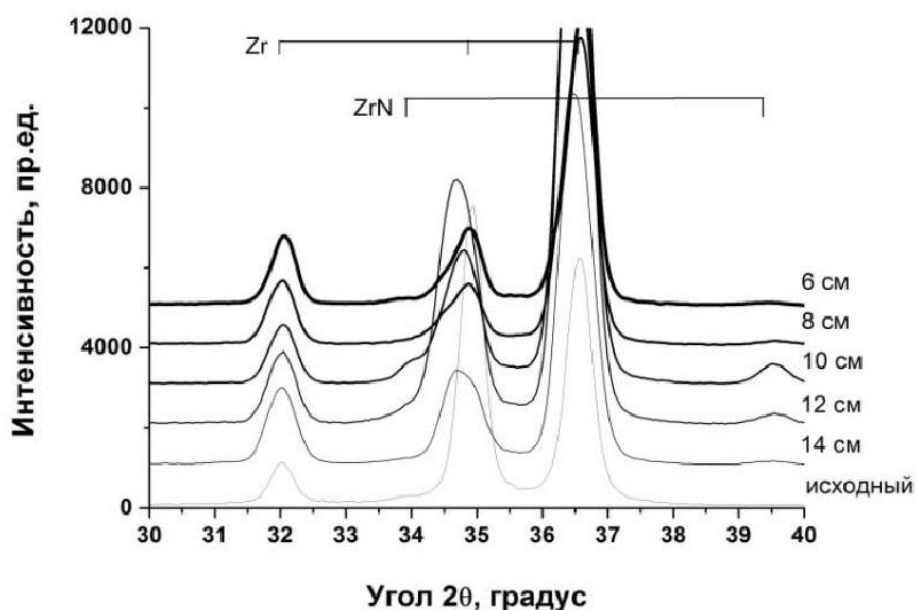


Рис.1. Дифрактограммы исходного образца циркония и образцов, обработанных КПП на различном расстоянии от центрального электрода.

При размещении образца на расстоянии 14 см и последующего воздействия КПП наблюдается сдвиг дифракционной линии (002) α -Zr (34.869°) в область меньших углов. Причиной этого может являться внедрение атомов азота в поры кристаллической решетки α -Zr и увеличение расстояния между базовыми плоскостями. При дальнейшем уменьшении расстояния и, соответственно, увеличении плотности

поглощенной энергии, наблюдается появление дифракционных линий ZrN. Максимальная интенсивность дифракционных линий ZrN достигается на расстоянии 10 см, затем интенсивность линий уменьшается с дальнейшим увеличением расстояния. Интенсивность дифракционных линий пропорциональна объемному содержанию нитрида в анализируемом слое и должна коррелировать с концентрацией в нем азота. Такое немонотонное поведение может быть объяснено влиянием двух основных механизмов [3]. Увеличение поглощенной энергии, с одной стороны, ведет к увеличению температуры поверхностного слоя и, как следствие, должно вести к увеличению скорости диффузии и концентрации азота в поверхностном слое. С другой стороны, рост поглощенной энергии приводит к увеличению интенсивности испарения материала, который формирует ударно-сжатый слой, удерживаемый непосредственно у поверхности образца набегающим компрессионным плазменным потоком и препятствующий проникновению атомов азота из атмосферы плазмообразующего вещества в расплав, являясь своего рода барьером. После окончания действия импульса зона компрессии плазменного потока начинает распадаться, что обуславливает рассеяние ударно-сжатого слоя, заполнение приповерхностной области азотом из окружающей атмосферы и, только тогда, создание условий для эффективной диффузии атомов азота в материале. Поэтому длительность диффузионного насыщения поверхностного слоя азотом, определяемая интервалом времени между рассеянием ударно-сжатого слоя и охлаждением поверхности образца до комнатной температуры, снижается при увеличении плотности поглощенной энергии вследствие увеличения времени рассеяния ударно-сжатого слоя.

Результаты измерения массы, удаленной с поверхности при воздействии КПП, представлены на рисунке 2. Из рисунка видно, что при расположении образцов на расстоянии, большем 10 см, начинается резкий рост удаленной массы. Однако, необходимо учитывать, что в используемом диапазоне поглощенной энергии доминирующим механизмом эрозии является гидродинамическое течение расплава под действием давления растекающегося вдоль поверхности плазменного потока [4, 5].

Была сделана оценка массы испаренного вещества (пренебрегая возможным процессом конденсации) через плотность потока атомов j , испаряющихся с поверхности образца по формуле [6]:

$$j = \alpha P(T) \sqrt{\frac{M}{4\pi kT}},$$

где $P(T)$ – давление насыщенных паров над поверхностью при температуре T , M – масса атома испаряемого вещества, α – постоянная (для случая испарения в вакуум $\alpha=0.53$).

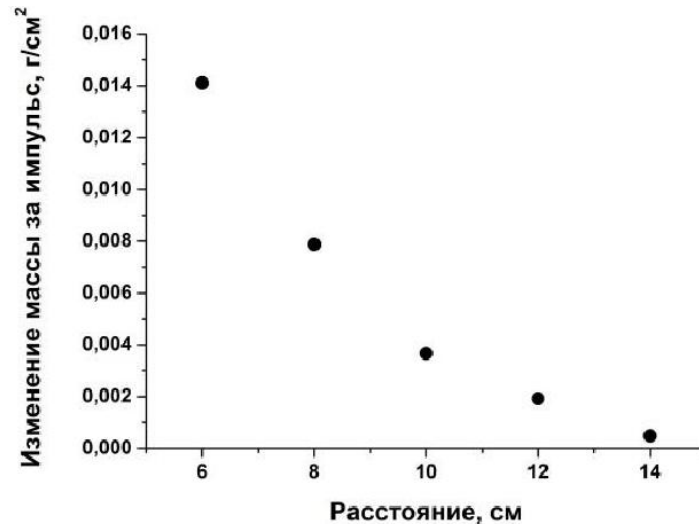


Рис.2. Зависимость удаленной массы с единицы площади поверхности образцов при обработке КПП от расстояния до центрального электрода.

Результаты оценки показали, что масса испаренного вещества на несколько порядков меньше экспериментально определенных величин. Таким образом, результаты, представленные на рисунке 2, преимущественно отражают действие гидродинамического механизма эрозии.

Список литературы

- [1] Mostafa Youssef, Ming Yang and Bilge Yildiz. Physical Review Applied, vol. 5, 2016, 014008-16
- [2] В.В.Углов, Н.Н.Черенда, В.М.Анищик, В.М.Асташинский, Н.Т.Квасов, Модификация материалов компрессионными плазменными потоками, Минск: БГУ, 2013, 248 с.
- [3] Н.Н. Черенда, В. И. Шиманский, В. В. Углов, В. М. Асташинский, В. А. Ухов Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, № 4, 2012, с. 35-42
- [4] V.I. Tereshin, I.E. Garkusha, A.N. Bandura, et.al. J. Nucl. Mater., vol. 313–316, 2003, 685–689.
- [5] И.М. Позняк, В.М. Сафронов, В.Ю. Цыбенко, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, т. 39, вып. 1, 2016, с. 15-21
- [6] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Статистическая физика. М.: Наука. 1964. С. 568.