ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ НА ЭРОЗИЮ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Молдабеков Ж.М., Жукешов А.М., Габдуллина А.Т., Амренова А.У., Серик К.

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Установка термоядерного реактора типа «Плазменный фокус» (ПФ-30) используется в качестве испытательного стенда для моделирования разрушения материалов за счет эрозии, потому что плотность энергии потока плазмы и продолжительность разряда того же порядка, что и в ИТЭР. Установка ПФ-30 использовалась для испытания материалов при плотностях энергии до 230 Дж/см². В данной работе представлены результаты исследований материалов элементного состава: Fe-79 %, C-19 %, Si-1 %, Fe-68 %, Cr-14 %, Mn-8 %, C-7 %, Si-1 % и Ti-90 %, Al-6 %, O-2 %, C-1 %. Была экспериментально определена зависимость эрозии данных материалов от плотности энергии плазменного потока. По результатам максимальное значение эрозии материалов составляет 0,2 мкм на Дж/см².

Ключевые слова: плазменный фокус, эрозия, кратер, толщина, потеря массы.

Введение

Одной из актуальных задач физики плазмы является исследование стойкости материалов первой стенки, дивертора и других узлов термоядерного реактора к воздействию горячей плазмы. На сегодняшний день перспективными материалами для строящегося реактора ITER считаются вольфрам, графит и сплавы на основе ванадия. Для имитации срывов плазмы на стенку необходимо иметь источники плазмы, обеспечивающие потоки с высокой плотностью мощности. Для этой цели наиболее подходят установки типа «Плазменный фокус», генерирующие плазму с энергией ионов до нескольких кэВ [1]. В этом направлении проводится широкий круг исследований, в том числе изучение эрозии поверхности материалов при воздействии импульсных плазменных потоков различной плотности энергии и состава [2].

Среди материалов, рассматриваемых как перспективные для использования в энергонагруженных частях термоядерных установок (как в конструкционных узлах, так и в качестве обращенных к плазме элементов), важное место занимают нержавеющие стали [2-5]. Различные марки нержавеющей стали уже испытаны как альтернативные материалы деталей конструкции реактора, испытывающие прямое воздействие мощных импульсных потоков плазмы [6, 7] и быстрых ионных пучков [1]. Как конструкционные материалы эти стали исследованы для использования в различных радиационных установках, включая сильноточные пинчевые установки, а также камеры термоядерных реакторов (ТЯР) с инерциальным и магнитным (ТОКАМАК и стелларатор) удержанием.

При импульсном облучении этих материалов важное место уделяется изучению эрозии первой стенки ТЯР, а также исследованию процесса диффузии газа, имплантированного в материал [6].

ТЕХНИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Установка «Плазменный фокус» (ПФ-30) является экспериментальным термоядерным реактором «ПФ-30», который состоит из камеры ПФ мейзеровского типа $(a_2/a_1 > 1)$, емкостного накопителя энергии, высоковольтного разрядника и коаксиальных проводов. Термоядерный реактор состоит из разрядной камеры плазменный фокуса, емкостного накопителя энергии, высоковольтного разрядника и токоподводов. В качестве емкостного накопителя энергии используется конденсаторная батарея из 24 конденсаторов ИК-50 с напряжением 30 кВ и суммарной емкостью 72 мкФ. Рабочее напряжение в экспериментеменяется в диапазоне 7-30 кВ, что соответствует изменению энергии от 10 до 240 кДж. В описываемых экспериментах в качестве плазмообразующего газа использовали водород [2-3].

Для реактора ПФ-30 была разработана новая электродная система. Внешний электрод представляет собой «беличье колесо» с диаметром 12 см, а внутренний электрод – цилиндр диаметром 2,5 см. Наружный электрод состоит из 6 цилиндрической формы стержней, расположенных по кругу, на расстоянии 2–3 см от центра (рисунок 1, а). Поджиг осуществляется через управляемый вакуумный разрядник, показанный на рисунке 1, б. Разряды проводили в среде остаточного вакуума при давлении 0,05÷0,1 Торр.

Результаты экспериментов и расчеты показали, что разрядный ток установки ПФ-30 при использовании 18 конденсаторов ИК-50 составляет максимально 1,24 МА при напряжении 24 кВ.

В каждом эксперименте по облучению мишеней потоками плазмы осуществляли контроль плотности энергии Q, поглощённой образцом. Для этих целей использовали калориметры. Зная площадь поверхности S, подвергавшейся воздействию плазмы, массу m, удельную теплоёмкость материала калориметра c и изменение его температуры ΔT , можно определить Q=cm $\Delta T/S$ [1]. Данные экспериментов с раз-

ной плотностью энергии представлены на рисунке 2. Из рисунка видно смещение области сжатия пучка плазмы вдоль оси системы. Так, при напряжении 7÷14 кВ область сжатия формируется на расстоянии 7–8 см от торца вешнего электрода, тогда как при 18÷24 кВ фокусировка наблюдается на 5 см. Обращает на себя внимание тот факт, что при 5 и 17 кВ сжатия плазмы практически не происходит.





б)

Рисунок 1. Электродная система (а) ПФ-30 и вакуумный разрядник (б)



Рисунок 2. График изменения плотности энергии от расстояния при различных значениях напряжения

После взаимодействием плазмы с материалом поверхность стальных образцов была исследована на оптическом и электронном сканирующем микроскопах. Потери массы за счёт эрозии и выброса частиц с поверхности определяли путём взвешивания мишеней на микроаналитических двухдиапазонных весах типа CPA225D до и после облучения. Точность взвешивания составляла 0,009 г при массе образца до 0,466 г.

Экспериментальные результаты

В качестве мишеней использовали плоские квадратные пластины размерами 1×1 см из титана, углеродистой и нержавеющей сталей. Для устранения краевых эффектов размеры образцов выбирались таким образом, чтобы они полностью перекрывали плазменный поток. Образцы подвергали серии плазменных воздействий на установке ПФ-30. Тепловую нагрузку Qв каждом образце постепенно увеличивали от 10 до 230 Дж/см². Облучение мишеней осуществляли при нормальном падении плазменного потока на поверхность. Для корректировки эксперимента после каждого воздействия образец мишени извлекался из рабочей камеры установки для измерения потерь массы и проведения анализа методами атомно-силовой микроскопии (АСМ), рентгеноспектрального анализа (РСА).

Гистограммы удельных потерь массы мишеней от тепловой нагрузки показаны на рисунке 3, а. Наиболее быстро убывает масса образцов углеродистой стали – для них потери массы монотонно возрастают до 0,48 г/см² за одно плазменное воздействие в интервале тепловых нагрузок $Q = 10 \div 230 \text{ Дж/см}^2$. В этом же интервале потери массы образца нержавеющей стали оказываются минимальными и на 1,5–2 порядка меньше, чем для углеродистой стали. При $Q = 217 \text{ Дж/см}^2$ они составляют всего 0,34 г/см² за воздействие.

Зная плотность материала мишени ρ , потери массы Δ т и диаметр плазменного потока *d*, можно определить среднюю скорость эрозии [5] за импульс

$$\Delta h = \frac{4\Delta m}{\pi \rho d^2} \; .$$

Как видно на графике, наиболее быстро эродирует углеродистая сталь. При тепловой нагрузке $Q = 230 \text{ Дж/см}^2$ с ее поверхности удаляется слой вещества толщиной 0,46 мкм за воздействие. Меньше всего подвержен эрозии титан – при той же плазменной нагрузке скорость эрозии этого материала составляет 0,37 мкм/импульс. Наиболее близким по скорости эрозии к титану оказывается нержавеющая сталь,толщина которой уменьшается за одно облучение на величину порядке 0,4 мкм при тепловой нагрузке $Q = 230 \text{ Дж/см}^2$.

Исследование образцов после проведения эксперимента показало, что в процессе облучения происходило распыление, плавление и испарение их поверхностных слоев. Оплавленная поверхность, как правило, имела волнообразный рельеф и содержала различные структурные дефекты: типа кратеров, наплывов, капель, пор, микротрещин и др. Ниже рассмотрены особенности повреждаемости и изменения топографической структуры поверхности облученных сталей в зависимости от их типа и от условий облучения. На рисунке 4 (а, б, в) показаны фотографии сканирования электронным пучком облученных участков поверхности образцов сталей состава Fe-79 %, C-19 %, Si-1 %, Fe-68 %, Cr-14 %, Mn-8 %, C-7 %, Si-1 % и титанового сплава Ti-90 %, Al-6 %,



O-2 %, C-1 %, полученные с помощью растрового электронного микроскопа Quanta 200i 3D.

На рисунке 4 (г, д, е) показаны результаты исследования поверхности образцов на АСМ после многократного плазменного воздействия. Для более глубокого изучения изменения рельефа поверхности образцов углеродистого стала в зависимости от кратности плазменного воздействия (Q = 217 Дж/см² после 1, 3, 5 и 10 кратного облучения) были получены графики, представленные на рисунке 5.



Рисунок 3. Удельные потери массы (а) и скорость эрозии (б) в зависимости от плотности энергии: • – образцов углеродистой стали;









Рисунок 5. Максимальная и средняя глубина кратера на поверхности образцов в зависимости от кратности плазменного воздействия: • – максимальная глубина; • – средняя глубина

Исследования ACM показали, что под действием плазменного потока материал начинается плавиться и на поверхности образца образуются кратеры, по которым можно судить о интенсивности процесса эрозии. Например, при увеличении кратности воздействия ($Q = 217 \text{ Дж/см}^2$) параметр H, показывающий глубину образующегося кратера, растет, как и его площадь.

На основании проведенных исследований ACMметодом быланайдена зависимость глубины кратера [5, 7] на поверхности образца углеродистого стала от кратности плазменного воздействия при фиксированной тепловой нагрузке (Q = 217 Дж/см²). Как видно из графика, глубина кратера почти линейно зависит откратности облучения, и при Q = 217 Дж/см² средняя скорость эрозии равна 0,2 мкм за воздействие.

Заключение

В работе исследовалось эрозия образцов титанового сплава, углеродистой и нержавеющей сталей под действием потоков плазмы с плотностью энергии 10÷230 Дж/см². Показано, что основным параметром, определяющим скорость эрозии металлов, являются удельные потери массы на поверхности материалов. Путем взвешивания на весах образцов до и после обработки плазмой, определена зависимость плотности энергии импульсной плазмы от эрозии. В результате проведенных исследований было обнаружено, что в момент уменьшения радиуса плазменного пучка плотность энергии плазмы увеличивается, и на поверхности материала появляется расплавленный слой, который вызывает утончение толщины образцов. В исследованном диапазоне плотностей энергии плазмы значения удельных потерь массы материала мишени на порядок превосходят эрозию, связанную с выбросом капель. При этом скорость эрозии сначала остаётся постоянной (близкой для всех металлов), а с увеличением плотности энергии резко возрастает. Анализ топографии поверхности исследуемого материала показал, что в согласии с таким результатом глубина кратеров, образуемых в процессе эрозии, растёт пропорционально кратности воздействия плазмы.

Литература

- 1. А.М. Жукешов Исследование импульсного разряда высокой мощности. Алматы: Қазақ университеті, 2014. 157 с.
- 2. Жукешов А.М., Ибраев Б.М., Гиниятова Ш.Г., Амренова А.У. Разработка разрядной камеры экспериментальной установки «Плазменный фокус». Вестник ЕНУ.– 2016. – №2.–С. 386-389.
- Жукешов А.М., Ибраев Б.М., Усеинов Б.М., Молдабеков Ж.М., Серик К., Ерлан С. Разработка узлов экспериментального реактора «Плазменный Фокус» // Сб. тез. 9-ой Межд. научн. конф. «Современные достижения физики и фундаментальное физическое бразование» – Алматы. – 2016. – С. 103.
- А.М. Жукешов, Габдуллина А.Т., Амренова А.У., Молдабеков Ж.М., Фермахан К. Структура нержавеющей стали после воздействия импульсных плазменных потоков // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 12-й Междунар. конф., Минск, Беларусь, 19–22 сент. 2017 г. / – Минск: Изд. Центр БГУ, 2017. – С. 239–241.
- 5. И.М. Позняк, Н.С. Климов, В.Л. Подковыров, В.М. Сафронов, А.М. Житлухин, Д.В. Коваленко. Эрозия металлов при воздействии интенсивных потоков плазмы // ВАНТ. сер. Термоядерный синтез, 2012, вып.4. стр. 23–33.
- 6. В.Н. Пименов, В.А. Грибков, Л.И. Иванов, Е.В. Демина, С.А. Масляев, А.В. Дубровский, М. Шольц, Р. Миклашевски, Ю.Э. Угаст, Б. Колман. Экстремальные импульсные воздействия энергии на малоактивируемые аустенитные стали // ВАНТ. 2005. № 3. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (86), с.144–150.
- H. Bolt, V. Barabash, A. Gervash, J. Linke, L.P. Lu, I. Ovchinnikov, M. Rodrig. Disruption simulation experiments in a pulsed plasma accelerator-energy absorption and damage evolution on plasma facing materials // Fusion technology 1994. Volume(1), p.387–390.

ИМПУЛЬСТЫ ПЛАЗМАНЫҢ МЕТАЛДЫ МАТЕРИАЛДАРДЫҢ БЕТТІК ЭРОЗИЯСЫНА ӘСЕРІ

Ж.М. Молдабеков, А.М. Жукешов, А.Т. Габдуллина, А.У. Амренова, К. Серик

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

Плазмалық фокус типті термоядролық реактор қондырғысы материалдардың күйреуін моделдеуде қолданатын сынамалы стенд болып табылады. Себебі мұндай қондырғылар плазмадағы энергия ағынының түсуі мен разряттың ұзақталығы бойынша ХТЭР (ИТЭР) аналогты түрі болып табылады. ПФ-30 қондырғысы, плазма ағынының энергиясы 230 Дж/см² дейін материалдарды сынақтан өткізе алады. Аталған жұмыста Fe-79 %, C-19 %, Si-1 %., Fe-68 %, Cr-14 %, Mn-8 %, C-7 %, Si-1 % және Ti-90 %, Al-6 %, O-2 %, C-1 % материалдарды зерттеу нәтижелері ұсынылған. Материалдардың эрозиясы плазманың энергия тығыздығына тәуелділігі тәжірибе жүзінде зерттелді. Нәтижеде материалдардың максималды эрозиясы Дж/см² 0,2 мкм тең болды. *Кілттік сөздер: плазмалық фокус, эрозия, кратер, қалыңдық, массалардың азаюы.*

THE INFLUENCE OF PULSED PLASMAS ON EROSION OF THE SURFACE OF METAL MATERIALS

Zh.M. Moldabekov, A.M. Zhukeshov, A.T. Gabdullina, A.U. Amrenova, K. Serik

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

Plasma focus are used as test beds for disruption simulation experiments on plasma facing materials, because the incident energy fluxes and the discharge duration are similar order as those expected during disruptions in ITER. The PF-30 facility was used for the testing of materials under incident energies up to 230 J/cm².

In this work have been tested Fe-79 %, C-19 %, Si-1 %, Fe-68 %, Cr-14 %, Mn-8 %, C-7 %, Si-1 % and Ti-90 %, Al-6 %, O-2 %, C-1 % materials. From the experimental results a scaling of the ablation with incident energy density was derived. The maximal resulting ablation depth on materials is 0.2 µm per J/cm² of incident energy density. *Key words:* plasma focus, erosion, crater, thickness, weight loss.