

Наименование проекта
AP08856026 «Экспериментальное исследование влияния критических тепловых нагрузок и плазменно-пучковых воздействий на облицовочный материал первой стенки ИТЭР»
Конкурс
Конкурс на ГФ по научным и (или) научно-техническим проектам на 2020-2022 годы со сроком реализации 27 месяцев (Приказ Председателя Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан от «30» апреля 2020 года № 63-нж)
Научный руководитель
Скаков Мажын Канапинович, 1952 г.р., д.ф.-м.н., профессор, академик КазНАЕН, главный научный сотрудник РГП НЯЦ РК Author ID в Scopus 6506859122 ORCID ID 0000-0001-6836-1214 индекс Хирша – 5
Исследовательская группа
<ol style="list-style-type: none"> 1. Миниязов Арман Жанарбекович, докторант PhD, 1987 г.р. Author ID в Scopus 57195102430 ORCID ID 0000-0002-2188-8075 Researcher ID in Publons P-7943-2018 2. Туленбергенов Тимур Рымбекович, аспирант АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 1985 г.р. Author ID в Scopus 55961123200 ORCID ID 0000-0002-1541-6231 Researcher ID in Publons R-1743-2017 3. Соколов Игорь Андреевич, магистр техники и технологии по специальности «Теплоэнергетика», 1987 г.р., Author ID в Scopus 56740171000 ORCID ID 0000-0002-7665-4022 4. Сапатаев Ержан Ернатулы, PhD, 1988 г.р. Author ID в Scopus 57226365313 ORCID ID 0000-0003-1252-0612 Researcher ID in Publons AAB-5761-2020 5. Даулетханов Ерхат Даулетханулы, PhD, 1992 г.р., магистр по специальности «Физика конденсированного состояния» 6. Букина Ольга Сергеевна, аспирант АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 1988 г.р. Author ID в Scopus 56532463200 ORCID ID 0000-0002-2564-0421 Researcher ID in Publons AAR-1783-2020
Краткая информация о проекте (цель, актуальность, ожидаемые результаты, полученные результаты, публикации, патенты)
<p>Цель: Экспериментально оценить рабочий ресурс покрытия из бериллия, как облицовочного материала первой стенки реактора ИТЭР в штатных условиях эксплуатации и при срывах плазмы термоядерного реактора.</p> <p>Актуальность: Первая стенка камеры ИТЭР будет подвергаться высоким тепловым нагрузкам, нейтронному облучению и высокому потоку заряженных частиц. В зависимости от расположения в основной камере бериллиевые панели будут подвергаться тепловому воздействию плотностью потока от 2 МВт/м² до 4,7 МВт/м² в штатном режиме. В связи с этим экспериментальные исследования по имитации термоядерных тепловых нагрузок на бериллиевые образцы с целью изучения возможного поверхностного повреждения, эрозии бериллия, который распыляется от первой стенки под действием плазмы и осаждается на диверторных мишенях являются актуальной задачей.</p> <p>В соответствии с задачами, поставленными на 2020-2021 гг., были получены следующие результаты:</p> <ul style="list-style-type: none"> - обосновано проведение исследований по оценке стойкости бериллия на основании условий реальной эксплуатации в термоядерном реакторе. Выявлено, что материал первой стенки будет подвергаться частым тепловым перегрузкам со стороны плазмы и механическому воздействию частиц с высокими энергиями, которые будут распылять материал и разрушать его структуру, а также способствовать загрязнению плазмы и переосаждению частиц бериллия в другие области токамака; - разработана методология проведения экспериментальных испытаний бериллия на основе изученных литературных данных и патентного поиска по его эксплуатации в качестве защитного покрытия в условиях ИТЭР. Сформированная в отчете методология будет включать в себя

проведение экспериментальных работ с использованием тепловой нагрузки и плазменного потока на поверхность бериллия с учетом расположения панелей первой стенки в камере ИТЭР и последующие материаловедческие исследования материала для определения влияния их на изменение свойств бериллия. Результатом воздействия плазмы на материал может быть распыление и испарение материала, изменения структуры и фазового состояния материала, а также образование на поверхности новых химических соединений;

- проведены испытания бериллиевого покрытия первой стенки вакуумной камеры ИТЭР, обращенного к плазме, в условиях воздействия критических тепловых нагрузок. Проведены экспериментальные работы по термическому воздействию на структуру поверхности бериллия, имитирующие срывы и переходные процессы в плазме ИТЭР. Были проведены эксперименты по термическому воздействию электронного пучка на бериллий марки ТГП-56 в вакууме, при значениях температуры поверхности бериллия ~ 360 °С, ~ 800 °С и ~ 1200 °С с количеством импульсов 1, 10 и 100 при одинаковой длительности импульса – 500 с;

- проведены материаловедческие исследования облученных образцов бериллия. Микроанализ (МА), рентгеноструктурный анализ (РСА), растровая электронная микроскопия (РЭМ), просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) и определение микротвердости (МТ) бериллия. Проведен сравнительный анализ с результатами необлученных образцов, который показал изменение шероховатости, массы, структуры и формы поверхности бериллия. Фазовый состав бериллия после облучения не изменился;

- получены экспериментальные данные о возможном оплавлении бериллия на границе между зазорами пластин первой стенки ИТЭР в результате воздействия термических нагрузок. Получены экспериментальные данные об изменениях практически важных механических свойств поверхности бериллия, материала первой стенки, обращенной к плазме, и данные о возможных оплавлениях бериллиевых пластин в результате воздействия критических тепловых нагрузок:

1) Основной вклад в увеличение шероховатости поверхности бериллия дает увеличение температуры тепловой нагрузки, нежели увеличение количества циклов.

2) Изменение массы образцов в процессе циклического воздействия происходит нелинейно, что связано с протеканием двух различных физико-химических процессов оксидирования (привес массы) и эрозии (потеря массы).

3) Изменения поверхностной структуры бериллия проявляются после воздействия термической нагрузки с температурой ~ 800 °С, где циклическое воздействие приводит к увеличению геометрических размеров пор. А масштабные изменения структуры и формы поверхности происходят при максимальной температуре ~ 1200 °С.

4) В результате рентгенофазового анализа дифрактограмм образцов бериллия, практически все пики дифрактограмм бериллиевых образцов с 1 по 10 с относительной интенсивностью более 0,5 % оказались определены. Основой фазового состава образца в исходном состоянии является гексагональная фаза металлического бериллия.

5) В результате проведенных ПЭМ исследований, электронограммы с образцов бериллия показали, что на поверхности образцов присутствует оксидная плёнка, что характерно для данного материала. В материале есть окислы, зерна характеризуются низкой плотностью дислокаций.

В соответствии с планом работ проекта и задачами на 2022 год были получены следующие результаты:

1. Проведены испытания бериллия марки ТГП-56 в качестве обращенного к плазме покрытия первой стенки вакуумной камеры ИТЭР в условиях воздействия водородной плазмы. Температура была выбрана исходя из условий моделирования и составила значения ~ 360 °С, ~ 800 °С и ~ 1200 °С при количестве импульсов 1, 10 и 100 и одинаковой длительности каждой экспозиции – 500 с. Флюенс ионов составил диапазон значений от $5,53 \cdot 10^{24}$ до $3,56 \cdot 10^{26}$, в зависимости от количества импульсов и мощности плазменно-пучкового разряда.

2. Рентгеноструктурный анализ установил, что основой фазового состава образца в исходном и облученном состоянии является гексагональная фаза металлического бериллия. Соотношения фазы бериллия и фазы оксида бериллия остается постоянным.
3. Изменение шероховатости имеет прямую линейную зависимость, как от увеличения температуры, так и от количества циклов. Основное изменение массы происходит у образцов, облученных при ~ 1200 °С, что связано с масштабной эрозией поверхности и испарением материала.
4. Эволюция микроструктуры поверхности сильно зависит от увеличения количества импульсов, которое приводит к увеличению количества и размера пор в материале. На основе просвечивающей электронной микроскопии установлено, что в материале есть окислы, а зерна характеризуются низкой плотностью дислокаций. Структура образцов после испытаний сформирована зернами бериллия, зернами (субзернами) окиси бериллия и характеризуется наличием большого количества нано- и субмикроразмерных частиц второй фазы, различного элементного состава.
5. Проведена оценка рабочего ресурса в часах, количестве импульсов при эксплуатации бериллиевого покрытия в условиях ИТЭР с учетом полученных экспериментальных результатов. Получены данные о рабочем ресурсе бериллиевого покрытия первой стенки на основе результатов исследований эрозионной стойкости, а также с учетом возможных механических повреждений и разрушений (заключительный отчет гос. рег. № 0120РК00225 от 20.10.2022 г.).

В заключение воздействие теплового потока и водородной плазмы при «нормальном» и «повышенном» тепловом потоке в ИТЭР не окажет критического влияния на разрушение краев и поверхности панелей, изготовленных из бериллия марки ТПП-56 даже после 100 рабочих импульсов. Таким образом, данный материал имеет высокую ресурсную стойкость к воздействию водородной плазмой в ИТЭР в условиях эксплуатации. В результате можно утверждать, что ресурсная стойкость бериллия марки ТПП-56 может обеспечить полный рабочий период ИТЭР без смены панелей в штатных условиях работы. Вследствие анализа результатов выявлено, что даже после 50000 с в «критических» условиях ($t_{вс} \sim 1200$ °С) бериллий лишь подвергается повышенной эрозии и испарению, но не имеет значимых микроструктурных изменений или механических повреждений. Такие данные подтверждают факт высокой ресурсной стойкости бериллия марки ТПП-56 с выбранной конфигурацией краев панелей первой стенки. Также установлено что, если поверхность материала будет рекристаллизована, то он и вовсе не подвергается эрозии даже при высоких температурах и ионных воздействиях.

Публикации за 2020-2022 год:

1. Sokolov I.A., Skakov M.K., Miniyazov A.Zh., Aubakirov B.T., Tulenbergenov T.R., Gradoboev A.V. Analysis of the beryllium stability under standard and critical operation in a fusion reactor // Eurasian Journal of Physics and Functional Materials. – 2021. – Vol.4.
2. Sokolov I.A., Skakov M.K., Miniyazov A.Zh., Tulenbergenov T.R., Zhanbolatova G.K. Interaction of plasma with beryllium // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – № 2064. (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2064/1/012070>) CiteScore – 0.7, 4 квартиль, Процентиль – 18.
3. Skakov M., Sokolov I., Miniyazov A., Tulenbergenov T., Sapatayev Y., Orazgaliyev N., Bukina O. Changes in structure of the surface and edges of beryllium plates as a result of thermal cycling tests // Fusion Engineering and Design. – 2022. – Vol. 183 (113251). <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2022.113251> (WoS, квартиль Q2 Nuclear science & Technology; Scopus процентиль 66 Nuclear Energy and Engineering).
4. Skakov M., Batyrbekov E., Sokolov I., Miniyazov A., Tulenbergenov T., Sapataev Y., Orazgaliyev N., Bukin O., Zhanbolatova G., Kozhakhmetov Y. Influence of Hydrogen Plasma on the Surface Structure of Beryllium // Materials. – 2022. – Vol. 15 (6340). <https://doi.org/10.3390/ma15186340> (Scopus, процентиль 64 General Materials Science; WoS, квартиль Q2 Physics, Applied).

5. Соколов И.А., Скаков М.К., Миниязов А.Ж., Туленбергенов Т.Р. Взаимодействие плазмы с бериллием // Материалы XXIV конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью». Москва, НИЯУ МИФИ, 4-5 февраля 2021 г.
6. Sokolov I.A., Skakov M.K., Miniyazov A.Zh., Tulenbergenov T.R. Research of beryllium stability under the conditions of operation of fusion installations // Proceedings of the XXV International Conference «Ion-Surface Interactions 2021». August 23–27, 2021, Moscow, Russia.
7. Соколов И.А., Скаков М.К., Туленбергенов Т.Р., Миниязов А.Ж. Термические испытания конструкционного материала первой стенки термоядерного реактора // Тезисы IX международной конференции «Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала». 07–09 сентября 2021 г., г. Курчатов, Республика Казахстан.
8. Sokolov I.A., Skakov M.K., Miniyazov A.Zh., Tulenbergenov T.R., Zhanbolatova G.K. Interaction of plasma with beryllium // Abstracts 15th International Conference «Gas Discharge Plasmas and Their Applications» GDP, 2021 September 5–10, 2021 Ekaterinburg, Russia.
9. Effect of cyclic thermal load on beryllium // Abstract book 10th International Conference on Nanomaterials and Advanced Energy Storage Systems (INESS-2022), August 4–6, 2022, Nur-Sultan, Kazakhstan.
10. Local thermal load simulation on beryllium under ITER operating conditions // Book of Abstracts 32nd Symposium on Fusion Technology (SOFT2022), September 18-23, 2022, Dubrovnik, Croatia.

Патенты:

1. Скаков М.К., Миниязов А.Ж., Туленбергенов Т.Р., Соколов И.А., Жанболатова Ф.Қ. Способ измерения ионного состава плазмы методом масс-анализа // Патент РК на изобретение № 2021/0620.1 от 14.10.2021. (Уведомление о проведении экспертизы по существу исх. №2022-6512 от 14.02.2022, штрих код 2587084).