

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 осажается на диверторных мишенях являются актуальной задачей.</p> <p>В соответствии с задачами, поставленными на 2020-2021 г.г., 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 пересадению 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.

Публикации за 2021 год:

– 1 статья в казахстанском журнале, рекомендованном ККСОН: I.A. Sokolov, M.K. Skakov, A.Zh. Miniyazov, B.T. Aubakirov, T.R. Tulenbergenov, A.V. Gradoboev / Analysis of the beryllium stability under standard and critical operation in a fusion reactor // Eurasian Journal of Physics and Functional Materials, 2021, Выпуск 4

– 1 статья в зарубежном журнале, входящем в БД Scopus: I.A. Sokolov, M.K. Skakov, A.Zh. Miniyazov, T.R. Tulenbergenov, G.K. Zhanbolatova / 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, Перцентиль – 18.

– тезисы по итогам конференций:

1. И.А. Соколов, М.К. Скаков, А.Ж. Миниязов, Т.Р. Туленбергенев / Взаимодействие плазмы с бериллием //Материалы XXIV конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью», Москва, НИЯУ МИФИ, 4-5 февраля 2021 г.

2. I.A. Sokolov, M.K. Skakov, A.Zh. Miniyazov, T.R. Tulenbergenov / «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.

3. Соколов И. А., Скаков М. К., Туленбергенев 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.

4. I.A. Sokolov, M.K. Skakov, A.Zh. Miniyazov, T.R. Tulenbergenov, G.K. Zhanbolatova / Interaction of plasma with beryllium // Abstracts 15 th International Conference “Gas Discharge Plasmas and Their Applications” GDP 2021 September 5–10, 2021 Ekaterinburg, Russia.

Получено положительное заключение формальной экспертизы по заявке на выдачу патента РК на изобретение от РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности» Министерства юстиции Республики Казахстан: Скаков М.К., Миниязов А.Ж., Туленбергенев Т.Р., Соколов И.А., Жанболатова Ф.Қ. / Способ измерения ионного состава плазмы встраиваемым масс-анализатором (заявка № 2021/0620.1 от 14.10.2021)