

**Сведения о ходе выполнения проекта по соглашению № 075-15-2019-1291 от 19.06.2019 (ранее - №14.613.21.0084 от 22.11.2017 г.)**

**(Руководитель проекта – кандидат физико-математических наук А.В. Спицын)**

В ходе выполнения проекта «Накопление изотопов водорода в конструкционных материалах, вольфраме и его сплавах для применения в энергетике» по Соглашению о предоставлении субсидии №14.613.21.0084 от 22 ноября 2017 года с Министерством образования и науки России в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» на этапе № 3 в период с 01 января по 31 декабря 2019 года выполнены следующие работы:

1. Проведены экспериментальные исследования накопления дейтерия в экспериментальных образцах сплавов вольфрама W-Re, W-V, W-Mo, W-Ta, W-Fe и W-Cr методом термодесорбционной спектроскопии.
2. Изготовлены экспериментальные образцы конструкционных ферритно-мартенситной стали и бронзы Cu-Cr-Zr с напылёнными плёнками вольфрама.
3. Выполнено повреждение ионами железа высоких энергий экспериментальных образцов сплавов вольфрама W-Mo и W-Ta.
4. Проведены экспериментальные исследования повреждений экспериментальных образцов сплавов вольфрама W-Mo и W-Ta, созданных ионами железа высоких энергий, методом рентгеновской люминесценции.
5. Проведены экспериментальные исследования накопления дейтерия в экспериментальных образцах сплавов вольфрама W-Re, W-V, W-Mo и W-Ta, повреждённых ионами железа высоких энергий, методом термодесорбционной спектроскопии.
6. Выполнено исследование влияния структурных дефектов кристаллической решетки на подвижность изотопов водорода в ОЦК железе методами многоуровневого моделирования.
7. Выполнены экспериментальные исследования накопления дейтерия в экспериментальных образцах конструкционных ферритно-мартенситной стали и бронзы Cu-Cr-Zr с напылёнными плёнками вольфрама, методом термодесорбционной спектроскопии.
8. Проведено обобщение и оценка результатов исследований.
9. Разработаны предложения и рекомендации по реализации (внедрению) результатов исследований.
10. Разработана методика минимизации накопления изотопов водорода в сплавах вольфрама W-Re, W-V, W-Mo и W-Ta.
11. Выработаны рекомендации по безопасному использованию сплавов вольфрама W-Re, W-V, W-Mo, W-Ta, W-Fe и W-Cr в контакте с дейтерием и тритием.

В ходе выполнения проекта изготовлены экспериментальные образцы сплавов вольфрама W-Re, W-V, W-Mo, W-Ta, W-Fe и W-Cr. Выполнена доработка математической модели для программы для исследования влияния структурных дефектов кристаллической решетки на подвижность изотопов водорода в объёмо-центрированной кубической кристаллической решетке методами многоуровневого моделирования и проведено исследование влияния структурных дефектов на подвижность изотопов водорода. В результате доработки модель позволила выполнять расчёты диффузии изотопов водорода в кристалле с учётом точечных дефектов. В результате расчётов показано, что энергия активации диффузии атома H вдоль ядра дислокации составляет 0,2 эВ. В зависимости от температуры подвижность водорода вдоль ядра дислокации от одного до нескольких порядков меньше подвижности водорода в объёме кристалла.

Выполнены экспериментальные исследования структуры экспериментальных образцов сплавов вольфрама W-Re, W-V, W-Mo, W-Ta, W-Fe и W-Cr с использованием методов сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения и других дополняющих методов. Изготовлен модуль для повреждения экспериментальных образцов сплавов вольфрама ионами железа высоких энергий. Изготовленный модуль для повреждения экспериментальных образцов сплавов вольфрама ионами высоких энергий позволяет облучать одновременно 4 экспериментальных образца ионами железа с энергией 5,6 МэВ при температуре от 300 до 600 К и давлении не выше  $10^{-4}$  Па. Выполнены повреждения ионами железа высоких энергий экспериментальных образцов сплавов вольфрама W-Re, W-Mo, W-Ta и W-V и экспериментальные исследования повреждений в этих образцах методом рентгеновской люминесценции. Выполнены экспериментальные исследования накопления дейтерия в экспериментальных образцах сплавов вольфрама W-Re, W-V, W-Mo, W-Ta, W-Fe и W-Cr методом термодесорбционной спектроскопии. Показано, что форма ТДС-спектра выхода дейтерия для сплавов W-Re, W-Mo, W-Ta, примерно одинакова, и существенно отличается от ТДС-спектра чистого монокристалла вольфрама; ТДС-спектры сплавов W-Re, W-Mo, W-Ta имеют большой пик в диапазоне температур 1000-1200 К; выход дейтерия из образцов сплава W-V наблюдается после 700 К, и достигает максимума при 1000 К; захват в сплав W-Mo в зоне повреждений в 2 раза больше чем в прочие сплавы; для сплава W-Mo, содержащего дефекты структуры, наблюдается увеличение пика выхода дейтерия в диапазон температур 750-800 К, относительно пика на ТДС- спектре исходного образца.

Изготовлены экспериментальные образцы бронзы Cu-Cr-Zr с напылёнными плёнками вольфрама и проведено исследование накопления дейтерия в этих плёнках. Выполнено обобщение результатов работ.

Получены два патента на полезные модели. Подготовлены и направлены в редакции журналов 4 статьи.

Иностранным партнером (Центр водородных исследований университета г. Тояма) выполнено экспериментальное исследование накопления дейтерия/третия в экспериментальных образцах сплавов вольфрама, повреждённых ионами высоких энергий, с использованием метода рентгеновской люминесценции насыщенных тритием образцов и выполнено сравнение и верификация экспериментальных данных по накоплению изотопов водорода в экспериментальных образцах сплавов вольфрама, полученных российской и японской группами методами термодесорбционной спектроскопии и методом рентгеновской люминесценции образцов, насыщенных тритием, а также обобщение и оценка результатов исследования.

Все задачи этапа №3 работ и проекта в целом выполнены в полном объёме и в соответствии с Планом-графиком исполнения обязательств и Техническим заданием Соглашения № 075-15-2019-1291 от 19.06.2019 (ранее – соглашение №14.613.21.0084 о предоставлении субсидий от 22.11.2017 и Дополнительного соглашения № 1 от 26 апреля 2018 г., № 2 от 28 апреля 2018 г., № 3 от 15 ноября 2018 г., № 4 от 30 апреля 2019 года).