

Сведения о ходе выполнения проекта

«Разработка и создание нового класса высокопрочных и высокомодульных конструкционных композиционных материалов с высоким сопротивлением статическим, повторно-статическим, динамическим и радиационным нагрузкам»

Руководитель проекта д-р физ.-мат. наук Курзина И.А.

В ходе выполнения проекта по Соглашению о предоставлении субсидии от 26 сентября 2017 г. № 14.575.21.0123 с Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» на этапе № 2 (заключительный) в период с 01.01.2018 г. по 31.12.2018 г. выполнены следующие работы:

1. Разработана методика получения экспериментальных образцов трехслойного материала «хромсодержащая сталь/ванадиевый сплав/хромсодержащая сталь»
2. Получены экспериментальные образцы трехслойного материала «хромсодержащая сталь/ванадиевый сплав/хромсодержащая сталь» в количестве не менее 10 шт.
3. Разработана программа и методики исследовательских испытаний полученных экспериментальных образцов трехслойного материала «хромсодержащая сталь/ванадиевый сплав/хромсодержащая сталь».
4. Проведены исследовательские испытания в соответствии с разработанной программой и методикам экспериментальных образцов трехслойного материала «хромсодержащая сталь/ванадиевый сплав/хромсодержащая сталь» до облучения.
5. Проведено воздействие облучения с использованием ускорителей тяжелых частиц или нейтронного облучения высокой интенсивности на экспериментальные образцы трехслойного материала «хромсодержащая сталь/ванадиевый сплав/хромсодержащая сталь».
6. Проведены исследовательские испытания в соответствии с разработанной программой и методикам экспериментальных образцов трехслойного материала «хромсодержащая сталь/ванадиевый сплав/хромсодержащая сталь» после облучения.
7. Разработаны технические требования по эксплуатации продукции с учетом технологических возможностей и особенностей индустриального партнера – организации реального сектора экономики.
8. Разработан проект технического задания на проведение ОТР по теме: «Разработка технологии получения жаропрочного, радиационно- и коррозионно-стойкого композиционного материала нового класса на основе ванадиевого сплава системы V-Ti-Cr и хромсодержащей стали типа X17».
9. Определены ключевые потребители, объемы потребления и технико-экономические параметры, оптимальные для последующего вхождения на рынок нового жаропрочного, радиационно- и коррозионно-стойкого композиционного материала.
10. Разработаны технические требования и предложения по разработке и производству изделий из трехслойного материала «хромсодержащая

сталь/ванадиевый сплав/хромсодержащая сталь» с учетом технологических возможностей и особенностей организации реального сектора экономики.

11. Откорректирован технологический лабораторный регламент на процесс получения экспериментальных образцов ванадиевого сплава.
12. Разработан проект технических условий экспериментальных образцов ванадиевого сплава.
13. Разработан технологический лабораторный регламент получения образцов трехслойного материала "хромсодержащая сталь/ванадиевый сплав/хромсодержащая сталь".
14. Проведены дополнительные патентные исследования.
15. Проведены исследовательские испытания механических свойств экспериментальных образцов трехслойного материала «хромсодержащая сталь/ванадиевый сплав/хромсодержащая сталь» до и после облучения.
16. Проведена технико-экономическая оценка рыночного потенциала полученных результатов.

Основные результаты проекта

Целью выполнявшихся работ на данном этапе ПНИ являлась разработка способа получения жаропрочного, радиационно- и коррозионностойкого композиционного материала нового класса на основе ванадиевого сплава системы V–Ti–Cr и хромсодержащей стали типа X17 для коммерческого использования в отечественных изделиях активной зоны атомных энергетических реакторов на быстрых нейтронах нового поколения, способного обеспечить радиационную и коррозионную стойкость изделий при сверхвысоких параметрах эксплуатации при температурах до 700 °С и дозах повреждения более 150 смещений на атом в условиях замкнутого ядерного топливного цикла.

Разработана методика получения экспериментальных образцов трехслойного материала «хромсодержащая сталь/ванадиевый сплав/хромсодержащая сталь», заключающаяся в получении ванадиевого сплава полученного методом порошковой металлургии с предварительным прессованием и последующем нанесение слоев хромсодержащей стали методом прямого лазерного выращивания. Используя технологию, представленную в заявке на патент «Способ получения трехслойного материала на основе ванадиевого сплава», были получены экспериментальные образцы трехслойного материала в количестве 12 штук.

Разработаны программы и методики исследования морфологии, структуры и фазового и химического состава экспериментальных образцов трехслойного материала «хромсодержащая сталь/ванадиевый сплав/хромсодержащая сталь» методами рентгеноструктурного (рентгенодифракционного) анализа (РСА), электронной просвечивающей (ПЭМ) и растровой (РЭМ) микроскопии, статические испытания на растяжение, на разрыв.

Исследованы образцы трехслойного материала из ванадиевого сплава V-4.9Ti-4.8Cr и коррозионностойкой стали типа X17H2. При изучении фазового состава было уделено внимание изучению трехкомпонентной диаграммы, которая является основой для изучения фазового состава ванадиевого сплава. Анализ диаграмм

состояния показал, что при малых концентрациях хрома и титана (до 5 %) образуются твердые растворы; определены параметры кристаллической решетки твердого раствора.

Исследования, выполненные методами рентгеноструктурного анализа, растровой электронной микроскопии с энергодисперсионным анализатором и просвечивающей электронной микроскопии, показали, что матрица ванадиевого сплава V4.9Ti-4.8Cr, полученного методом спекания, представляет твердый раствор V(Ti, Cr) с ОЦК кристаллической решеткой. Твердый раствор не однороден по концентрации. Внутри зерен матрицы V(Ti, Cr) в незначительных количествах присутствуют микрочастицы орторомбического карбида $V_{55}Cr_{25}C_{20}$, являющиеся источниками внутренних полей напряжений, величина которых в локальных участках сплава составляет величину ~ 350 МПа (средняя амплитуда внутренних напряжений в сплаве составляет величину 10 ± 5 МПа).

Исследования структуры ванадиевого сплава в зоне, приближенной к переходной, показали, что дополнительная термическая обработка трехслойного материала приводит к некоторому увеличению средних размера зерна. Переходная зона трехслойного материала после дополнительной термической обработки. Амплитуда внутренних напряжений в переходной зоне в среднем не превышает 10 МПа.

Получен трехслойный многофазный материал с устойчивой переходной зоной, характеризующейся наличием высокой степенью взаимодиффузии компонентов. В полученном материале средняя амплитуда внутренних напряжений в сплаве составляет величину 10 ± 5 МПа. Полученный материал является коррозионностойким. Оценочный балл коррозионной стойкости составляет 9 баллов.

Экспериментальные образцы трехслойного материала «хромсодержащая сталь/ванадиевый сплав/хромсодержащая сталь» под воздействием облучения с использованием ускорителей тяжелых частиц и моделирования нейтронного облучения высокой интенсивности» были имплантированы ионами тантала при 650 °С до дозы не более 200 сна со средней энергией около 200 кэВ до экспозиционной дозы $2 \cdot 10^{18}$ ион/см². С применением метода ускоренного воздействия, моделирующего воздействие нейтронов, разработанного на основе современного состояния физической проблемы создания новых радиационно-стойких материалов, а также физических оценок, были облучены экспериментальные образцы трехслойного композита «хромсодержащая сталь/ванадиевый сплав/хромсодержащая сталь», обеспечена повреждающая доза порядка 200 сна. В результате ионного воздействия образцы сохранили первоначальную форму и размеры; на поверхностях образцов не появилось новых царапин, сколов, трещин, а также следов оплавления и перфорации; отсутствуют отслоения материала образцов; на поверхности образцов отсутствуют электроэрозионные треки.

В работе исследовались образцы трехслойного материала из ванадиевого сплава V-4.9Ti-4.8Cr и коррозионностойкой стали X17H2 после облучения. Все исследования проведены в переходной зоне хромсодержащая сталь/ванадиевый сплав. Установлено, что переходная зона между слоями увеличилась до 200 мкм. Анализ химического состава трехслойного

материала после облучения в отожжённом образце, показал, что ванадий диффундирует в железо на глубину до 150 мкм, общая ширина переходной зоны составляет до 250 мкм. Облучение материала не приводит к изменению фазового состава как качественному, так и количественному. Скалярная плотность дислокаций в материале резко уменьшается, уменьшается и величина амплитуды внутренних напряжений по материалу. Все это приводит к дополнительному упрочнению материала. Показано, что облучение трехслойного материала «хромсодержащая сталь/ванадиевый сплав/хромсодержащая сталь» не изменяет коррозионную стойкость трехслойного материала.

Был разработан проект технического задания на проведение опытно-технологических работ по теме: «Разработка технологии получения жаропрочного, радиационно- и коррозионно-стойкого композиционного материала нового класса на основе ванадиевого сплава системы V-Ti-Cr и хромсодержащей стали типа X17».

Разрабатываемая технология предназначена для получения высококачественных сплавов на основе ванадия с титаном и хромом (далее – сплавов), перспективных для использования в термоядерной энергетике вакуумтермическим способом, а также композиционного материала на основе ванадиевого сплава и хромсодержащей стали типа X17.

Разработаны технологические требования и предложения по разработке и производства изделий из трехслойного материала «хромсодержащая сталь/ванадиевый сплав/хромсодержащая сталь». Разработан технологический лабораторный регламент получения трехслойного материала «хромсодержащая сталь/ванадиевый сплав/хромсодержащая сталь».

По результатам выполнения проекта оформлены и получены следующие РИД:

- Секрет производства (ноу-хау) «Экспрессный способ определения коррозионной устойчивости композиционного материала на основе ванадиевого сплава системы V-Ti-Cr». Приказ ТГУ № 1024/ОД от 26.10.2018 г.
- Секрет производства (ноу-хау) «Способ моделирования нейтронной деградации конструкционных материалов воздействием ионами тяжелых металлов». Приказ ТГУ № 1106/ОД от 19.11.2018 г.
- Секрет производства (ноу-хау) «Способ получение трехслойного материала сталь–ванадиевый сплав–сталь методом гетерофазной порошковой металлургии». Приказ ТГУ № 1148/ОД от 03.12.2018 г.
- Заявка на патент № 2017145451 «Способ получения сплава на основе ванадия с добавлением Ti и Cr в вакуумной дуговой печи».
- Заявка на патент № 2018134789 «Способ получения трехслойного материала на основе ванадиевого сплава».

Работы, предусмотренные Техническим заданием и План-графиком, в отчетном периоде выполнены в полном объеме.