

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЗОНЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОТОТИПА КОРИУМА СО СТАЛЬЮ 15Х2НМФА

В.В. Бакланов, А.В. Градобоев, М.К. Скаков, И.М. Кукушкин

*При проведении экспериментов по физическому моделированию процессов протекающих при тяжелых авариях на АЭС, востребованной является информация по свойствам формирующихся материалов. При изучении вопроса внутрикорпусного удержания расплава материалов активной зоны реактора (кориума), важно установить характер его воздействия на материал корпуса. В данной работе представлены результаты материаловедческих исследований зоны взаимодействия прототипа кориума с материалом днища силового корпуса реактора. Результаты получены методами оптической металлографии и методом рентгеновской дифрактометрии поликристаллов.*

*Ключевые слова: моделирование тяжелой аварии, прототип кориума, днище корпуса реактора, сталь 15Х2НМФА, оптическая металлография, рентгеновская дифрактометрия.*

### ВВЕДЕНИЕ

Вопросы обеспечения безопасности АЭС являются важнейшими в атомной энергетике. Им уделяется особое внимание и при проектировании новых объектов рассматриваются различные ситуации эксплуатации реакторов, в том числе также рассматриваются и варианты запроектных аварий тяжелых аварий (ТА), подобных произошедшим на АЭС «Три-Майл-Айленд», «Чернобыль», [1] «Фукусима-1». Все гипотетические сценарии протекания ТА решаются с помощью специально разрабатываемых компьютерных кодов. Однако при этом в связи с неоднозначностью протекающих процессов их сложностью и дефицитом знаний свойств реакторных материалов и формирующихся соединений, проводятся работы по экспериментальному изучению процессов и свойств затвердевших материалов расплава активной зоны (кориум) и продуктов его взаимодействия с конструкционными материалами реактора.

Так в рамках ряда международных проектов стоит задача по получению информации о характере взаимодействия кориума с материалом днища силового корпуса легководяного реактора [2, 3]. Сложность реализации таких натуральных экспериментов делает очень актуальной получаемую исследователями информации.

В рамках представленной работы рассмотрены результаты материаловедческих исследований образца корпусной стали 15Х2НМФА после взаимодействия с прототипом кориума в эксперименте INVECOR-4. Данный эксперимент был реализован в рамках проекта INVECOR при финансовой под-

держке МНТЦ [1]. Целью данных работ было экспериментальное моделирование тепловых и физико-химических процессов при удержании бассейна расплава прототипного кориума на днище водоохлаждаемого корпуса реактора. Проведенные металлографические исследования взаимодействия стали с прототипом кориума позволяют получить информацию о характере воздействия расплава на материал днища реактора.

### ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является стальной цилиндрический образец 15Х2НМФА установленный в модель днища корпуса реактора (МДР) после физического моделирования процесса взаимодействия с прототипом кориума легководяного реактора ( $UO_2 - 76,2$  вес. %;  $ZrO_2 - 9,3$  вес. %;  $Zr - 14,5$  вес. %.)

Схема расположения образца в МДР представлена на рисунке 1. В процессе извлечения затвердевшего материала из МДР после эксперимента INVECOR-4 [4] часть материала в центральной части не удалось отделить от стальной стенки (рисунок 2). Таким образом в зоне расположения центрального образца наблюдалось существенное взаимодействие прототипа кориума со сталью, соответственно центральный образец представлял наибольший интерес для исследования.

При анализе результатов показаний датчиков температуры, установленных на различной глубине образца было выявлено, что максимальная температура данного образца не превысила  $1175$  °С, что существенно ниже

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЗОНЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОТОТИПА КОРИУМА СО СТАЛЬЮ 15Х2НМФА

температуры плавления данной стали (1450°C). Соответственно можно предположить, не происходило плавление стали, а образование данной зоны обусловлено взаимодействием компонентов кориума с ней с образованием более легкоплавких соединений.

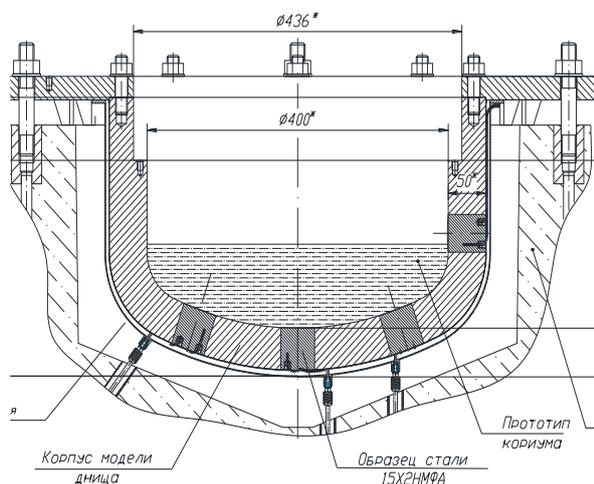


Рисунок 1 – Схема модели днища реактора



Рисунок 2 – Кориум в МДР после эксперимента INVECOR-4

Для изучения полученного результата был выполнена резка МДР и извлечен образец корпусной стали с продуктами взаимодействия с прототипом кориума. Далее для проведения металлографических исследований был выполнен диаметральный разрез образца с помощью алмазного абразивного диска при водяным охлаждении. Внешний вид поверхности шлифа после резки и шлифовки представлен на рисунке 3.

На поверхности шлифа невооруженным взглядом наблюдается зона с отличная по цвету, наличию мелких пор и трещин от мат-

ричной структуры. Максимальная глубина данной зоны достигает 20 мм.

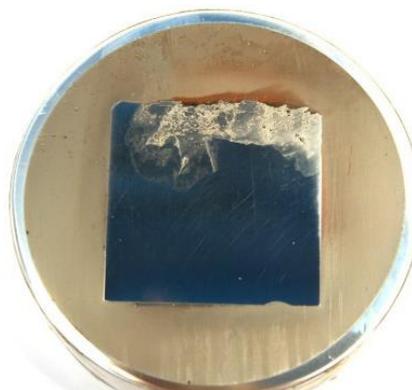


Рисунок 3 – Металлографический шлиф диаметрального разреза стального образца

### МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Далее для выявления всей структуры на поверхности шлифа была выполнена полировка и химическое травление (водный раствор царской водки). Для выявления структурных составляющих зоне взаимодействия проводилось измерение значений микротвердости. Микротвердость измерялась на приборе ПМТ-3М вдавливанием четырехгранной алмазной пирамидки, нагрузка на индентор 150 г.

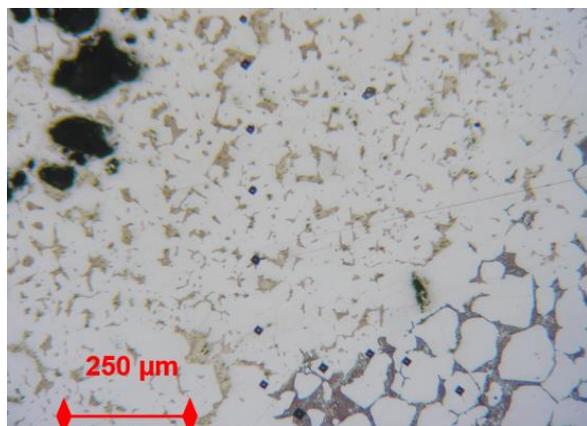
Исследования выполнялись на металлографическом микроскопе OLYMPUS BX-41 при увеличении до 1000 крат. Некоторые характерные микроструктуры зоны взаимодействия представлена на рисунке 4.

По характеру микроструктуры можно сделать вывод, что происходило растворение компонентов стали (эвтектической плавление) в зоне взаимодействия и компоненты кориума внедрялись в сталь. Микротвердость данной области находится в диапазоне 7,01 – 9,92 ГПа. Такие значения микротвердости может объясняться присутствием интерметаллидных фаз (Zr, U) Fe<sub>2</sub> которые формируются при жидкофазном взаимодействии компонентов кориума и стали в процессе эксперимента.

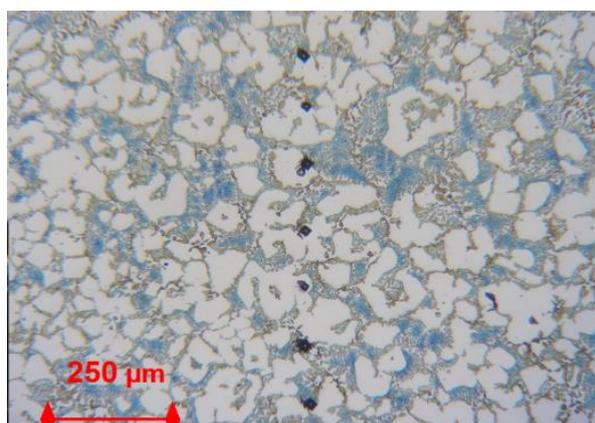
Микроструктура шлифа в зоне перехода от претерпевшего взаимодействия материала к основному матричному стали 15Х2НМФА, представлен на рисунке 5.

Со стороны стали наблюдается четко очерченная граница, далее выявляется промежуточный слой около 150 мкм, микротвердость которого значительно ниже чем микро-

твердость стали (3,15 - 3,6 ГПа) и составляет 1,37 ГПа, что характерно для структуры феррита.



а) верхняя часть



б) нижняя часть

Рисунок 4 – Микроструктура зоны взаимодействия



Рисунок 5 – Микроструктура зоны перехода

## РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рентгеноструктурные исследования проводились на модернизированной системой RM-4 дифрактометре ДРОН-3 в медном излучении с использованием монохроматора на дифрагированном пучке. Идентификация фазовых составляющих производилась с использованием кристаллографических данных базы данных PDF. Для фазового и элементного анализа были вырезаны фрагменты образца из второй-ответной части шлифа расположение зон анализа обозначены на шлифе (рисунок 6). Поверхности полученных фрагментов, перед съемкой были отшлифованы до аналогичного основному шлифу состоянию.

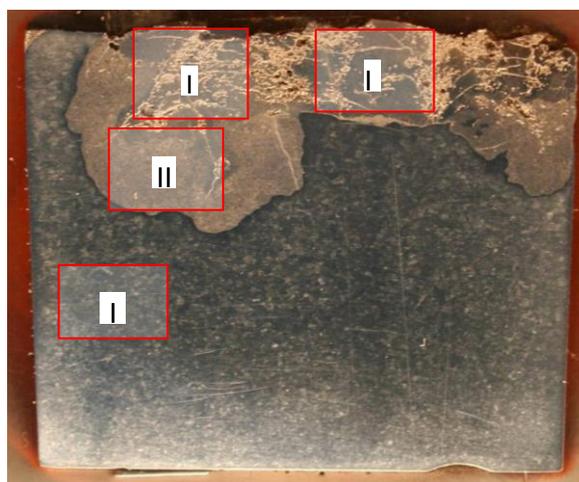


Рисунок 6 – Структура шлифа и зоны для фазового и полуколичественного элементного анализа

Результаты определения фазового и полуколичественного элементного состава приведены в таблице 1.

Основными компонентами фазового состава в исследуемых зонах являются интерметаллидные фазы  $(Zr,U)Fe_2$  (ферромагнетик, фаза Лавеса с кубической решеткой типа  $MgCu_2$ ) и металлическая фаза на основе  $\alpha$ -железа с ОЦК кристаллической решеткой. По результатам анализа пиков фазы  $(Zr,U)Fe_2$  можно предположить, что состав этой фазы в области III более размыт, чем в областях I и II. В исследуемых зонах фаз твердых растворов  $UZrO$  не обнаруживается.

Выявленное присутствие интерметаллидных фаз хорошо коррелирует с данными микроструктурных исследований.

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЗОНЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОТОТИПА КОРИУМА  
СО СТАЛЬЮ 15Х2НМФА**

Таблица 1 – Фазовой и элементный состав выделенных зон

Зона	Фазовый состав	Концентрация элементов, % вес.		
		Zr	U	Fe
I	(U,Zr)Fe <sub>2</sub> (a <sub>0</sub> ≈0,703±0,710 нм); α-Fe (a <sub>0</sub> ≈0,287 нм); (Zr)(C,O) <sub>1-x</sub> (0,468 нм)	20	60	17
II	(U,Zr)Fe <sub>2</sub> (a <sub>0</sub> ≈0,705 нм); α-Fe (a <sub>0</sub> ≈0,287 нм); (Zr)(C,O) <sub>1-x</sub> (0,468 нм)	25	60	15
III	(U,Zr)Fe <sub>2</sub> (a <sub>0</sub> ≈0,704±0,708 нм); α-Fe (a <sub>0</sub> ≈0,287 нм); (Zr)(C,O) <sub>1-x</sub> (0,468 нм)	15	60	20
IV	α-Fe (a <sub>0</sub> ≈0,287 нм)	-	-	97

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате проведенных материаловедческих исследований, были получены следующие результаты.

– Установлена наглядная картина результата взаимодействия прототипа кориума со сталью.

– В результате исследований подтверждено взаимодействие кориума с материалом модели корпуса реактора, получены данные по глубине взаимодействия, определен состав материала в зоне повреждения, установлены образовавшиеся фазы и измерена их микротвердость

– В процессе измерения микротвердости характерных областей на образце, было выявлено, что наибольшей микротвердостью обладают интерметаллидные фазы, в которых взаимодействие кориума со сталью было наиболее заметно и содержание компонент кориума Zr и U выражено в наибольшей степени.

– Данные рентгеновского фазового анализа показали, что в исследуемом образ-

це, в зоне взаимодействия при температуре около 1200 °С, основными компонентами фазового состава являются интерметаллидные фазы (Zr,U)Fe<sub>2</sub> (ферромагнетик, фаза Лавеса с кубической решеткой типа MgCu<sub>2</sub>) и металлическая фаза на основе α-железа с ОЦК кристаллической решеткой.

Полученные данные являются важной информацией для понимания процессов взаимодействия расплава активной зоны с корпусом легководного реактора. Полученные характеристики позволяют понять механизмы происходящих физико-химических процессов на границе кориум/сталь и непременно должны быть учтены при обосновании концепции внутрикопусного удержания кориума при тяжелой аварии.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Владимиров, В. А. Социальные аспекты радиоактивного загрязнения окружающей среды после ядерных взрывов и радиационных аварий / В. А. Владимиров // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. – 2012. – № 2. – С. 632-659.

2. Zhdanov, V. Study of the processes of corium-melt retention in the reactor pressure vessel (IN-VECOR) / Zhdanov V., Baklanov V. et al. // Proceedings of ICAPP'11 congress, Nice, France, May 2-5, 2011. – Nice, 2011. – Paper 11375.

**Бакланов В. В.** – аспирант ЮТИ ТПУ специальность 01.04.07 Физика конденсированного состояния; заместитель директора Филиала ИАЭ РГП НЯЦ РК; e-mail: [baklanov@nnc.kz](mailto:baklanov@nnc.kz), тел.: +77014483763

**Градобоев А. В.** – д.т.н., профессор кафедры сварочного производства ЮТИ ТПУ; e-mail: [gradoboev1@mail.ru](mailto:gradoboev1@mail.ru)

**Скаков М. К.** – д.ф.-м.н., профессор, академик КазНАЕН, заместитель генерального директора по науке РГП НЯЦ РК; тел.: 8 (72-251) 2-34-01; e-mail: [skakov@nnc.kz](mailto:skakov@nnc.kz),

**Кукушкин И. М.** – начальник лаборатории Филиала ИАЭ РГП НЯЦ РК; тел.: +7778550703; e-mail: [kukushkin@nnc.kz](mailto:kukushkin@nnc.kz)