УДК: 621.039.53

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИМИТАТОРА РАСПЛАВА АКТИВНОЙ ЗОНЫ BWR С НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛЬЮ SUS 316L

Гречаник А.Д., Скаков М.К., Бакланов В.В., Кукушкин И.М., Кожахметов Е.А.

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В работе представлены краткое описание экспериментального стенда и основные результаты эксперимента, в котором моделировалось взаимодействие расплава активной зоны реактора типа BWR с внутрикорпусными материалами, в частности, с нержавеющей сталью SUS 316L. В результате проведенного эксперимента и постэкспериментальных исследований были получены данные о структуре и свойствах провзаимодействовавшей с кориумом стальной пластины. Полученные данные остро востребованы для создания методики извлечения и переработки реального расплава активной зоны аварийного реактора.

Введение

Возникновение тяжелых аварий на АЭС возможно. И, как показывает практика [1, 2], вероятность таких аварий не так уж мала. В очередной раз это было подтверждено аварией, произошедшей на АЭС *"Fukushima-1"* в 2011 г. в Японии.

При аварии на водо-водяном реакторе АЭС "Fukushima-1" ядерное топливо было расплавлено из-за прекращения функционирования всех систем охлаждения реактора. Образовавшийся в результате аварии кориум перемещался и мог затвердевать в различных областях реакторной установки [3]. Одной из задач, которую необходимо решить для ликвидации последствий этой аварии, является удаление затвердевшего кориума из корпуса реактора и контаймента АЭС. Основной проблемой при решении этой задачи является отсутствие достоверных данных о состоянии и свойствах затвердевшего кориума, что затрудняет разработку и создание инструментов для его удаления [4, 5].

В связи с этим на базе Института атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан (ИАЭ НЯЦ РК) по заказу японской компании *Toshiba* был проведен ряд экспериментов [6], целью которых являлось изучение свойств имитатора кориума АЭС "*Fukushima-1*" для создания методики извлечения и переработки реального затвердевшего расплава активной зоны аварийного реактора.

1. Экспериментальное оборудование

Крупномасштабный эксперимент по исследованию взаимодействия кориума с конструкционными материалами реактора типа *BWR* проводился на установке *LAVA B* (рисунок 1). Основные узлы данной установки – это электроплавильная печь (ЭПП) и устройство приема расплава (УПР).

ЭПП предназначена для плавления различных композиций из тугоплавких материалов и сброса расплава в экспериментальную секцию (ловушку), находящуюся в УПР. Корпус печи изготовлен из немагнитного материала (нержавеющая сталь), имеет форму цилиндра. Внутри корпуса расположен водоохлаждаемый 16-ти витковый индуктор. Днище и крышка ЭПП изготовлены из меди и имеют водяное охлаждение. В центре ЭПП расположен тигель из чистого изостатического графита. Теплоизоляцией тигля служит графитовый войлок.

УПР установки LAVA В изготовлено из немагнитной нержавеющей стали и имеет форму цилиндра с двумя эллиптическими основаниями, ось цилиндра расположена горизонтально. В верхней части УПР расположена горловина, на которую устанавливается ЭПП. Внутренняя поверхность УПР теплоизолирована композиционным материалом для уменьшения утечки тепла во время эксперимента. В корпусе УПР сделаны технологические люки, которые используются для монтажа измерительных устройств.



теплообменник ЭПП; 2 – ЭПП; 3 – технологический люк УПР;
4 – съемное основание УПР; 5 – УПР

Рисунок 1. Внешний вид установки LAVA В



1 – ловушка расплава; 2 – бетонная подставка; 3 – трубопровод слива воды; 4 – кольцевой коллектор охлаждения; 5 – пластины опытных образцов; 6 – трубопровод подачи воды

Рисунок 2. Схема экспериментальной секции

Основными элементами экспериментальной секции, участвовавшей в данном эксперименте, являлась ловушка расплава, с установленными в ней пластинами из конструкционных материалов, и бетонное основание, на которое устанавливается ловушка расплава (рисунок 2). Для охлаждения стальной ловушки расплава в зазор между ловушкой и бетонным основанием была обеспечена подача воды.

2. Параметры эксперимента

В плавильный тигель ЭПП была загружена шихта, состоящая из диоксида урана (71,5 масс. %), карбида бора (0,7 масс. %) и металлического циркония (27,8 масс. %).

Пластины, установленные в ловушке расплава, были изготовлены из сталей марок SUS 304¹, SUS 316L², SQV2A³ и никелевого сплава 600⁴. В данной статье рассматриваются только результаты исследований взаимодействия имитатора кориума с пластиной SUS 316L.

Нагрев шихты в ЭПП производился до температуры 2500-2600 °С. После получения расплава шихты в тигле ЭПП и достижения подведенной к ЭПП интегральной энергии около 300 МДж, расплав был слит в ловушку расплава.

3. Результаты экспериментов

После окончания эксперимента и остывания экспериментальной секции, она извлекалась из устройства приема расплава (рисунок 3), далее производилось извлечение пластин, скрепленных с затвердевшим расплавом, из которых изготавливались образцы для материаловедческих исследований.

На рисунке 4 мы можем видеть, что верхняя часть пластины SUS 316L, выступающая над расплавом, была расплавлена, нижняя же часть пластины (рисунок 5), погруженная в расплав кориума, сохранила свою целостность. Согласно показаниям термопар (рисунок 6), установленных в пластине, температура в верхней ее части достигала ~2000 °C, что значительно выше температуры плавления стали SUS 316L – 1375–1400 °C [7].



Рисунок 3. Вид ловушки после окончания эксперимента

Для исследования взаимодействия расплава кориума с пластиной стали было выбрано две области, расположенные на границе между материалом пластины и застывшим расплавом кориума. Одна из данных областей располагалась в верхней части пластины, другая в нижней (рисунок 7). Основными видами исследования являлись SEM-EDS анализ, рентгенофазовый анализ и измерение микротвердости.

¹Состав стали SUS 304 (масс. %): 0–0,08 С, 0–1 Si, 0–2 Mn, 0–0,045 P, 0–0,03 S,

^{18–20} Cr, 8–11 Ni, 0–0,1 N, основа – Fe ²Состав стали SUS 316L (масс. %): 0–0,03 C, 0–1 Si, 0–2 Mn, 0–0,045 P, 0–0,03 S, 16–18 Cr, 10–14 Ni, 0–0,1 N, основа – Fe

³Состав стали SQV2A (масс. %): 0,25 C, 0,15–0,4 Si, 1,15–1.5 Mn, 0,03 P, 0,03 S, 0,45-0,6 Мо, основа - Fe ⁴Состав сплава 600 (масс. %): 0,15 С, 0,5 Si, 1 Mn, 0,015 S, 6–10 Fe, 14–17 Cr,

основа – Ni

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИМИТАТОРА РАСПЛАВА АКТИВНОЙ ЗОНЫ BWR С НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛЬЮ SUS 316L



Рисунок 4. Виды пластины SUS 316L, прошедшей взаимодействие с расплавом кориума



Рисунок 5. Схема вырезки образцов из пластины SUS316L, стрелками указана исследуемая поверхность образцов



Рисунок 6. Изменение показаний термопар, установленных на пластине из стали марки SUS 316L (от момента слива расплава в ловушку) и схема расположения термопар



А-2 (нижняя часть пластины)



В-1 (верхняя часть пластины)

Рисунок 7. Исследовательские образцы, вырезанные из пластины SUS316L, с обозначенными на них областями для детальных исследований

В результате SEM-EDX исследований и рентгенофазового анализа образца, вырезанного из нижней части пластины SUS 316L, было установлено, что основными фазами в приграничной области взаимодействия со стороны кориума (рисунки 8, 9) являются:

 твердый раствор на основе α-Zr, содержащий в себе уран и компоненты стали, включения данной фазы имеют, в основном округлую форму;

 соединения на основе железа, содержащие помимо компонентов стали уран и цирконий;

- твердый раствор на основе оксида урана.

Основными фазами в приграничной области со стороны пластины (рисунки 8, 10) за исключением матрицы, состав которой соответствует составу стали SUS 316L, являются:

 фаза на основе железа, имеющая в своем составе значительное содержание никеля и урана; смежная с вышеописанной фаза, отличающаяся от матрицы повышенным содержанием Ni, Si и Мо, пониженным содержанием хрома, а также наличием в составе циркония и урана;

 фаза на основе хрома, включения данной фазы имеют игловидную форму.

В результате SEM-EDX анализа образца, вырезанного из верхней части пластины SUS 316L, было установлено, что основными фазами в приграничной области взаимодействия со стороны кориума (рисунки 11, 12) являются:

 твердый раствор на основе α-Zr, содержащий в себе уран и компоненты стали, включения данной фазы имеют, в основном округлую форму;

 соединения на основе железа, содержащие помимо компонентов стали уран и цирконий;

- твердый раствор на основе оксида урана.



Рисунок 8. SEM изображения области 2 образца А-2 – область взаимодействия пластины SUS316L с кориумом (рисунок 7)



Рисунок 9. SEM снимок области 2 образца A-2, расположенной со стороны кориума вблизи пластины SUS316L, с указанием элементного состава присутствующих на ней фаз



Рисунок 10. SEM снимок области 2 образца A-2, расположенной со стороны пластины SUS316L вблизи границы с кориумом, с указанием элементного состава присутствующих на ней фаз

Основными фазами в приграничной области со стороны пластины (рисунки 11, 13) за исключением матрицы, состав которой соответствует составу стали SUS 316L, являются:

 фаза на основе железа, имеющая в своем составе значительное содержание никеля и урана;

 смежная с вышеописанной фаза, отличающаяся от матрицы повышенным содержанием Ni, Si и Мо, пониженным содержанием хрома, а также наличием в составе циркония и урана;

 фаза на основе железа, отличающаяся по составу от SUS 316L повышенным содержанием хрома и пониженным содержанием никеля.



Рисунок 11. SEM изображения области 1 образца В-1 – область взаимодействия пластины SUS316L с кориумом (рисунок 7)



Рисунок 12. SEM снимок области 1 образца В-1, расположенной со стороны кориума вблизи пластины SUS316L, с указанием элементного состава присутствующих на ней фаз



Рисунок 13. SEM снимок области 1 образца В-1, расположенной со стороны пластины SUS316L вблизи кориума, с указанием элементного состава присутствующих на ней фаз

Определение микротвердости фаз, присутствующих на исследуемых образцах, производилась на микротвердомере ПМТ-3М по методу Викерса при нагрузке 100 грамм-силы.

Фазы, обнаруженные в приграничных с пластиной областях кориума, обладают следующими значениями микротвердости:

- наименьшей микротвердостью обладает соединение на основе железа – 492±11 HV;

- микротвердость твердого раствора на основе оксида урана – 721±12 HV;

- наибольшую микротвердасть имеет твердый раствор на основе $\alpha\text{-}Zr-1808{\pm}129~HV.$

Результаты измерения микротвердости в приграничной с кориумом области пластины представлены на рисунках 14, 15.



Рисунок 14. Диаграмма, демонстрирующая результаты измерения микротвердости вдоль линии, проходящей через область взаимодействия пластины SUS316 с кориумом, расстояние между уколами составляло 0,5 мм (рисунок 15)



Рисунок 15. Изображение области взаимодействия пластины SUS316 с кориумом, на которой производилось измерение микротвердости

4. Обсуждение результатов

Из представленных выше результатов видно, что фазовый состав кориума, находящегося вблизи верхней и нижней частей пластины одинаков. Основные фазы, которые он в себя включает – это твердый раствор на основе α-Zr, твердый раствор на основе оксида урана и фаза, состоящая, в основном, из компонентов стали SUS 316L.

Фазовый состав материала пластины, граничащего с кориумом в верхней и нижней ее частях, также совпадает. Основные фазы в приграничном с кориумом материале пластины, помимо матрицы, по составу соответствующей SUS 316L, - это две фазы на основе железа, содержащие основные компоненты SUS 316L, уран и цирконий. Данные фазы являются смежными, отличаются содержанием хрома, никеля, урана и циркония: одна из фаз содержит значительно больше никеля, урана, циркония, и значительно меньше хрома, чем другая. Также в приграничной области пластины наблюдается фаза, отличающаяся по составу от SUS 316L повышенным содержанием хрома. Все эти фазы имеют в основном вытянутую форму с непрямолинейными очертаниями, что говорит о том, что они имеют более низкую температуру плавления, чем матрица, так как причиной образования включений такой формы могло послужить проникновение расплава данных фаз вглубь пластины по границам зерен матрицы, либо сжимание расплава данных фаз растущими зернами матрицы. В приграничной с кориумом нижней части пластины данные фазы, пересекаясь между собой, образуют сеть, плотность расположения данных фаз в верхней части пластины значительно меньше. Это может быть связано

с более быстрым остыванием расплава кориума в верхней части слитка и более длительным поддержанием высокой температуры в донной части слитка, что поспособствовало проникновению урансодержащих фаз в глубь пластины.

Микротвердость граничащих с кориумом областей пластины не отличается от микротвердости центральной ее части, т.е. микротвердость образовавшихся в приграничных областях пластины цирконий- и урансодержащих фаз не превышает микротвердость стали SUS 316L.

Выводы

Крупномасштабный эксперимент показал, что в результате взаимодействия остывающего расплава кориума с пластиной SUS 316L толщиной 20 мм, произошло оплавление только верхней части пластины, выступающей над расплавом, значительной деформации и эрозии нижней части пластины, покрытой расплавом, не произошло. Проникновение компонентов кориума в материал пластины оказалось не менее значительным, чем проникновение компонентов стали в кориум, особенно в нижней части пластины. Компоненты стали в кориуме содержатся преимущественно в виде включений на основе железа, состав их близок к составу SUS 316L. Компоненты кориума в стали содержатся преимущественно в легкоплавких включениях на основе железа, данные включения образуют сетчатую структуру в граничащей с кориумом области пластины, твердость данных включений не превышает твердость матрицы - SUS 316L.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что конструкции, изготовленные из SUS 316L, довольно стойко выносят взаимодействие с остывающим расплавом кориума, при условии, что они обладают достаточной толщиной. Взаимодействие компонентов стали с кориумом не приводит к образованию фаз более твердых, чем α -Zr. Это является важной информацией при выборе методики извлечения реального затвердевшего расплава активной зоны аварийного реактора.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Proc. of the Fist Int. Information Meeting on the TMI-2 Accident. (Germatown, MD), 1985.
- 2. Абагян А.А., Аршавский И.М., Дмитриев В.М. Атомная энергия. 1991. Т. 71, вып. 4. С. 275–287.
- Technical Strategic Plan 2017 for Decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station of Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. August 31, 2017 http://www.dd.ndf.go.jp/en/strategic-plan/book/20171005_SP2017eFT.pdf (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. англ.
- Бакланов, В. В. Взаимодействие кориума с корпусом водо-водяного энергетического реактора при тяжелой аварии: диссертация кандидата технических наук: 01.04.07 / Бакланов Виктор Владимирович. – ФГАОУВО Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2017. – 163 с.
- 5. T. Washiya, et. al., Characterization of Fuel Debris Properties for Decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Stations, Proceedings of WRFPM 2014, Sendai, Japan, Sep. 14–17, 2014, Paper No. 100151.
- 6. S. Kawano, et al.: Characterization of Fuel Debris by Large-scale Simulated Debris Examination for Fukushima Daiichi Nuclear Power Stations, Materials of The International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, Fukui and Kyoto, Japan, 2017.
- Steel Grades, Properties and Global Standards // Centrumtryck AB Avesta, May, 2013 http://www.outokumpu.com/Site CollectionDocuments/Outokumpu-steel-grades-properties-global-standards.pdf (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. англ.

ВWR БЕЛСЕНДІ АУМАҚТЫҢ БАЛҚЫТПАСЫНЫҢ ЕЛІКТЕГІШІ SUS 316L ТОТТАНБАЙТЫН БОЛАТПЕН ӨЗАРА ӘРЕКЕТІН ЗЕРТТЕУ НӘТИЖЕСІ

А.Д. Гречаник, М.К. Скаков, В.В. Бакланов, И.М. Кукушкин, Е.А. Кожахметов

ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Жұмыста BWR типті белсенді аумақтың балқытпасының корпус ішілік материалдармен, атап айтқанда SUS 316L тоттанбайтын болатпен өзара әрекетін моделдеген эскперименттік стендтің сипаттары және эксперименттің негізгі нәтижелері берілген. Жүргізген эксперименттік және эксперименттен кейінгі зерттеулердің нәтижесінде кориуммен өзара әрекеттесетін болат пластиналардың құрылымы мен қасиеті туралы мәліметтер алынды. Алынған мәліметтер апаттық реактордың белсенді аумағының шынайы балқытпасын алу және қайта өңдеу әдісін құру үшін аса қажетті.

RESULTS OF RESEARCH OF THE INTERACTION BETWEEN BWR ACTIVE ZONE MELT IMITATOR AND STAINLESS STEEL SUS 316L

A.D. Grechanik, M.K. Skakov, V.V. Baklanov, I.M. Kukushkin, E.A. Kozhakhmetov

Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The paper presents a brief description of experimental stand and main results of experiment, which simulated the interaction of BWR core melt with construction materials, in particular with stainless steel SUS 316L. As a result of the experiment and post-experimental studies, data were obtained on the structure and properties of SUS 316L steel plate, which interacted with the melt. The data obtained is necessary for creating a method for extracting and processing of real emergency reactor core melt.