

УДК 620.186

Взаимодействие расплава топлива и стали с имитатором опорной плиты стержня регулирования

Н.Е. Мухамедов¹, А.Д. Вурим¹, А.В. Пахниц¹, В.К. Цхе^{2,*},
Е.А. Кожахметов¹

¹Филиал «Институт Атомной Энергии» РГП НЯЦ РК, г. Курчатов, Республика Казахстан

²ВКТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*E-mail: tskhe@nnc.kz

Аннотация. Извлечение затвердевшего расплава активной зоны из поврежденных реакторов путем сверления либо резки требует знания как механических свойств, так и его микроструктуры. В данной работе был получен образец расплава стали, извлеченный из испытательной секции ампульного облучательного устройства (АОУ), имитирующей опорную плиту стержня регулирования реактора на быстрых нейтронах. Проведены разрушающие и неразрушающие исследования, а также получена визуальная информация о внутреннем состоянии элементов конструкций испытательной секции АОУ после проведения внутриреакторного эксперимента на реакторе ИГР. Изучена его микроструктура и микротвердость, а также проведен фазовый элементный анализ. По полученным результатам определен характер взаимодействия и параметры разрушения стенки чехловой трубы и стенки направляющей трубы стержня регулирования.

Ключевые слова: реактор, активная зона, расплав, микроструктура, микротвердость

The interaction of fuel melt and steel with the control rod base plate simulator

N.Ye. Mukhamedov¹, A.D. Vurim¹, A.V. Pakhnits¹, V.K. Tskhe^{2,*},
Ye.A. Kozhakhmetov¹

¹IAE NNC RK, Beybit Atom street, 10, Kurchatov, East-Kazakhstan region, 071100, Republic of Kazakhstan

²D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, 69, Protozanov Street, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan

*E-mail: tskhe@nnc.kz

Abstract. Removing the solidified core melt from damaged reactors by drilling or cutting requires knowledge of both mechanical properties and its microstructure. In this work, a steel melt sample was obtained, extracted from the test section of an ampoule irradiation device (AID), simulating the base plate of the control rod of a fast neutron reactor. Destructive and non-destructive studies were carried out, as well as visual information was obtained on the internal state of structural elements of the AID test section after an in-pile experiment at the IGR reactor. Its microstructure and microhardness have been studied, and phase elemental analysis has been carried out. Based on the results obtained, the nature of the interaction and the parameters of destruction of the wall of the jacket tube and the wall of the guide tube of the control rod were determined.

Keywords: reactor, core, melt, microstructure, micro-hazard

Для решения задач по изучению процессов, протекающих при тяжелых авариях в ядерном реакторе и для исследования свойств формирующихся сплавов и соединений наиболее эффективным инструментом является масштабное физическое моделирование, где могут быть получены данные не только для валидации результатов расчетов, но и для решения реальных проблем. В настоящее время экспериментальные работы как реакторные [1-3], так и вне реакторные [4, 5] по физическому моделированию тяжелых аварий проводятся во многих исследовательских центрах мира.

Одним из основных ожидаемых результатов исследований процессов, сопровождающих тяжелые аварии энергетических реакторов с плавлением активной зоны, является экспериментальное подтверждение возможности создания активной зоны, защищенной от аварии с повторной критичностью, которая может произойти в случае образования компактного бассейна расплавленного топлива. Для исключения повторной критичности при аварии быстрого реактора с плавлением его активной зоны предполагается использование в конструкции ТВС внутренних труб, обеспечивающих контролируемое перемещение расплавленного топлива.

Реализованный внутриреакторный эксперимент предназначен для изучения возможности разрушения расплавом топлива двойной стенки, имитирующей стенку чехловой трубы и стенку направляющей трубы стержня регулирования реактора на быстрых нейтронах, и перемещения расплава материалов активной зоны реактора на быстрых нейтронах по имитатору направляющей трубы стержня регулирования СУЗ.

Целью исследований являлось получение экспериментальных данных о характере взаимодействия расплавленного топлива с конструктивными элементами АОУ.

Полученные результаты будут использованы для прогнозирования параметров разрушения стенки чехловой трубы и стенки направляющей трубы стержня регулирования реактора на быстрых нейтронах, при разработке конструкции активной зоны, защищенной от аварии с повторной критичностью.

После проведения эксперимента было выполнено извлечение испытательной секции из ампулы и выполнен продольный рез нижней части камеры, соответствующий исходному месту расположения в ней ТВС, с целью получения визуальной информации о внутреннем состоянии элементов конструкции.

Визуальный осмотр показал, что стенки камеры плавления (и наружная, и внутренняя), значительно повреждены и расплавлены. Осталась не расплавленной

модель опорной плиты направляющего стержня, полость под которой была заполнена натрием (рисунок 1а).

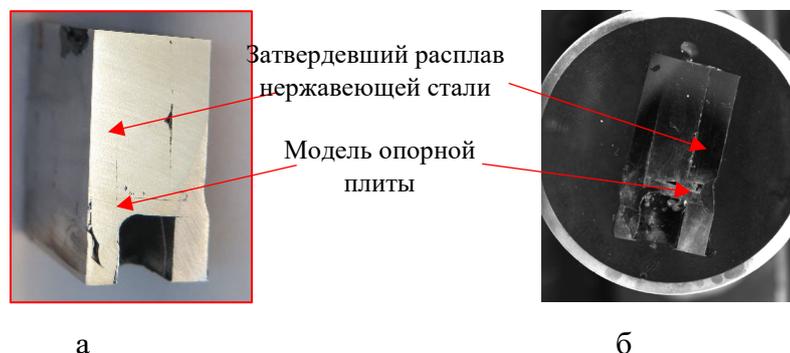


Рисунок 1. Образец внутренней полости камеры плавления ТВС (а) и внешний вид подготовленного шлифа (б).

Для изучения характера взаимодействия расплава топлива и стали с имитатором опорной плиты стержня регулирования был отобран и подготовлен образец к металлографическому анализу. Внешний вид подготовленного шлифа расплава стали приведен на рисунке 1б. Структура образцов исследовалась с помощью сканирующего микроскопа Tescan Vega3 с системой энергодисперсионного микроанализа Oxford X-Act.

Материалом, как и ожидалось в соответствии с внешним видом слитка на рисунке 1б, является монокристаллический затвердевший расплав с преимущественно металлической составляющей (в металлической матрице образца присутствовало лишь незначительное количество серых участков с керамической составляющей). Характерная микроструктура представлена на рисунке 2.

Из анализа состояния микроструктуры полученных образцов следует, что материал в основном однородный по всей области, с характерной микроструктурой, состоящей из светлой и темной структурных составляющих.

Для идентификаций элементного состава затвердевшего расплава был проведен ЭДС-анализ всей поверхности полученного образца кориума, полученные данные элементного состава в массовых процентах представлены в таблице 1.

Таблица 1. Элементный состав поверхности исследуемого образца в масс.%.

Название спектра	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	U
масс.%.	0.21	0.74	0.41	18.15	69.40	10.15	0.95

По полученным результатам элементного анализа определено, что материал состоит из двух основных фаз темного и светлого оттенка, которые характерны фазе металлического урана (светлая фаза) и железа (темная фаза). Кроме того, было выявлено, что в микроструктуре имитатора опорной плиты стержня регулирования не наблюдаются включения в виде металлического урана (верхняя часть на рисунках 2).

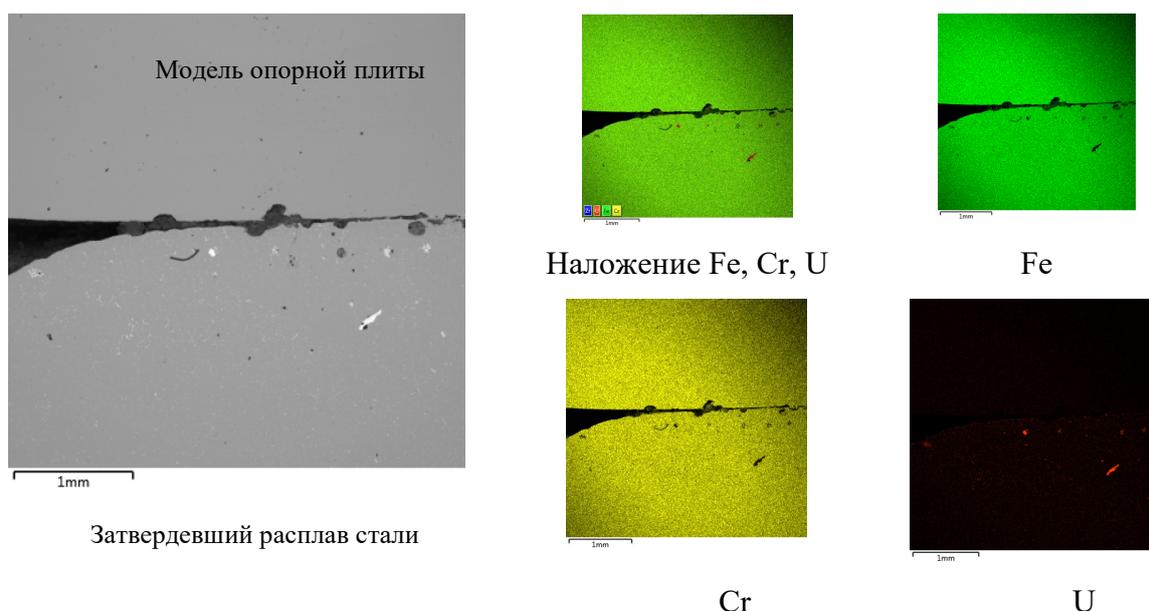


Рисунок 2. Микроструктура поверхностного слоя и результаты ЭДС-анализа.

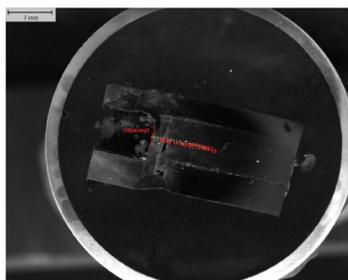
Для идентификации элементного состава включений был проведен локальный элементный анализ. Результаты локального элементного анализа представлены в таблице 2.

Таблица 2. Элементное содержание включений в образце, масс. %.

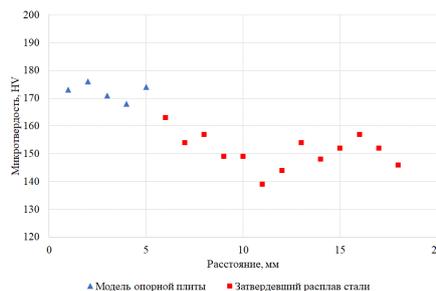
Номер спектра	O	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Zr	U
Спектр №1	19.10	-	-	-	-	2.00	-	-	78.90
Спектр №2	-	-	-	-	8.06	39.71	14.56	-	37.67
Спектр №3	-	0.30	0.70	0.60	17.84	67.51	10.66	0.80	1.59
Спектр №4	2.18	0.50	0.57	0.92	15.88	56.95	10.66	6.59	5.74

В рамках исследований также были проведены работы по определению распределения микротвердости по поверхности образца. Определение значений микротвердости осуществлялось при помощи микротвердомера Q10A+ по схеме Виккерса при нагрузке на индентор 200 г.

На рисунке 3а приведена схема измерения микротвердости образца. Измерения проводились с шагом 0,5 мм. На рисунке 3б представлен результат распределения микротвердости по поверхности исследуемого образца.



а



б

Рисунок 3. Схема определения микротвердости (а) и результат распределения микротвердости по поверхности образца (б).

Анализ полученных данных показывает, что микротвердость модели имитатора опорной плиты стержня регулирования незначительно выше микротвердости затвердевшего расплава стали, что в свою очередь указывает на незначительное влияние расплава на имитатор опорной плиты стержня регулирования во время проведения эксперимента. В результате проведенных разрушающих исследований получена визуальная информация о внутреннем состоянии элементов конструкций испытательной секции АОУ после проведения эксперимента в центральном экспериментальном канале реактора ИГР, также результаты материаловедческих исследований подтверждают, что после контактного взаимодействия расплава топлива и стали с моделью опорной плиты, последняя сохраняет свою целостность и не разрушается.

Список литературы

1. Guidez, J. ESFR smart project conceptual design of in-vessel core catcher / J. Guidez, A. Gerschenfeld, J. Bodi, P. Romojaro, U. Diaz-Chiron // Proceedings of the 2018 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, ICAPP 2018. – 2018. – 26-35.
2. Skakov, M. Research of structural-phase state of a natural corium of a fast power reactors / M. Skakov, N. Mukhamedov, I. Deryavko, W. Wieleba, A. Vurim // Vacuum. – 2017. – 141. – 216-221.
3. Sehgal, B.R. SIMECO Experiments on in-vessel melt pool formation and heat transfer with and without a metallic layer / B.R. Sehgal, T.N. Dinh, V.A. Bui, J.A. Green, G. Kolb // Proceeding of OECD Workshop on ex-vessel, debris coolability. – Germany: Garching, 1998. – 198-206 с.
4. Imaizumi, Y. Development of evaluation method for in-place cooling of residual core materials in core disruptive accidents of SFRs / Y. Imaizumi, K. Matsuba, M. Aoyagi, K. Kamiyama, V.V. Baklanov // International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE. – 2019
5. Кашинский, О.Н. Экспериментальное исследование влияния дистанционирующей решетки на структуру течения в ТВС реактора АЭС-2006 / О.Н. Кашинский, П.Д. Лобанов, Н.А. Прибатурин, А.С. Курдюмов, С.Е. Волков // Теплоэнергетика. – 2013. – № 1. – С. 63-67.