

УДК 620.173

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НОУ И ВОУ ТОПЛИВА РЕАКТОРА ИГР

Даулетханов Е.Д., Сапатаев Е.Е., Кожаметов Е.А., Мухамеджанова Р.М., Бельдеубаев А.Ж., Уркунбай А.С.

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

E-mail: dauletkhanov@nnc.kz

В данной работе представлены результаты механических испытаний высокообогащённых ураном (ВОУ) и низкообогащённых ураном (НОУ) топливных материалов реактора ИГР после термоциклирования при различных температурах и количестве циклов «нагрев-охлаждение».

Определены изменения прочностных характеристик НОУ и ВОУ топлива в зависимости от режимов термоциклических испытаний.

Ключевые слова: реактор ИГР, термоциклирование, испытание на сжатие, прочность.

ВВЕДЕНИЕ

Применение высокообогащенного урана (ВОУ) в качестве топлива в исследовательских реакторах не соответствует концепции снижения глобальной угрозы распространения ядерного оружия. По этой причине в течение более двадцати лет предпринимаются международные мероприятия по прекращению использования ВОУ в исследовательских реакторах посредством поддержки конверсии этих установок на низкообогащенное топливо (НОУ), которое не может использоваться в качестве расщепляющегося материала в ядерном оружии [1, 2]. Одним из условий перехода от ВОУ к НОУ топливу является, по возможности, сохранение нейтронно-физических характеристик действующих реакторов [3, 4].

В процессе эксплуатации реактора ИГР элементы активной зоны испытывают температурное воздействие, которое, возможно, будет приводить к образованию дефектов, возникающих в результате термических напряжений при резком нагреве, и дефектов, возникающих вследствие газовой выделению из топлива.

Для обоснования возможности использования НОУ топлива необходимо спрогнозировать изменения физико-механических свойств в процессе эксплуатации. С этой целью проводятся комплексные испытания НОУ топлива реактора ИГР [5]. Одним из решений является проведение испытаний образцов данных материалов на прочность после термоциклирования.

Данные результаты будут использованы для оценки возможности использования НОУ топлива при конверсии реактора ИГР.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследований являются образцы ВОУ и НОУ уран-графитового топлива реактора ИГР после термоциклирования (см. таблицу 1). Образцы для испытания на сжатие имеют форму куба с размерами 5×5×5 мм. Максимальное отклонение фактических геометрических размеров от заданного не превышает 3 %.

Таблица 1. Основные характеристики НОУ и ВОУ топлива

Наименование параметра	НОУ топливо	ВОУ топливо
Материал	графит марки АРВ-2	графит марки 11-03
Топливо	UO ₂ – 98,5 % масс. U ₂ O ₃ – 1,48 % масс.	уранилдинитрат
Обогащение урана-235, %	19,75	90
Концентрация урана, г/кг	28,0 ... 29,0	3,1

Основные параметры термоциклирования при различных температурах и количестве циклов «нагрев-охлаждение» приведены в таблице 2. По три образца каждого вида топлива были испытаны на стенде «Лиана» при максимальной температуре нагрева 1000 °С с различным количеством циклов «нагрев-охлаждение»: 30, 70 и 100. По одному образцу каждого вида топлива были испытаны на экспериментальных установках термогравиметрического анализа TGA/DSC2 (комплекс «ТиГра») при температуре 1130 °С, количество циклов – 100.

Таблица 2. Основные параметры термоциклирования НОУ и ВОУ топлива

Образцы ВОУ топлива	Образцы НОУ топлива	Кол-во циклов «нагрев-охлаждение»	Макс. темп., °С	Оборудование
ВОУ-1	НОУ-1	100	1130	Комплекс «ТиГра»
ВОУ-2	НОУ-2	100	1000	
ВОУ-3	НОУ-3			
ВОУ-4	НОУ-4			
ВОУ-5	НОУ-5	70		
ВОУ-6	НОУ-6			
ВОУ-7	НОУ-7			
ВОУ-8	НОУ-8	30		
ВОУ-9	НОУ-9			
ВОУ-10	НОУ-10			

Для определения прочностных характеристик были проведены механические испытания при комнатной температуре на универсальной испытательной машине Instron 5966. Прочностные характеристики материала элементов активной зоны определялись методами определения предела прочности при сжатии по ГОСТ 23775 - 79 [6].

Метод определения предела прочности при сжатии состоит в установлении отношения величины нагрузки, предшествующей разрушению образца, на первоначальную площадь его поперечного (номинального) сечения. Испытания проводились до разрушения испытуемого образца при скорости перемещения активного захвата равной 2 мм/мин.

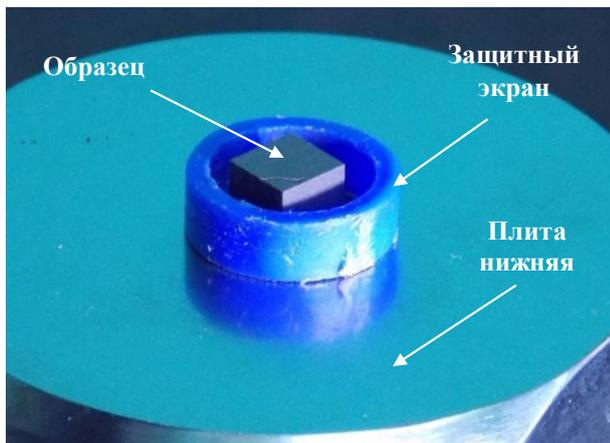


Рисунок 1. Внешний вид испытуемого образца

Для предотвращения потери осколков при испытаниях образец расположили внутри защитного экрана из пластика с внутренним диаметром 10 мм и с высотой 4 мм (см. рисунок 1).

Предел прочности при сжатии ($\sigma_{сжi}$) рассчитывались по формуле:

$$\sigma_{сжi} = \frac{P_i}{S},$$

где P – разрушающая нагрузка на образец, кН; S – номинальная площадь поперечного сечения, мм².

Площадь поперечного сечения вычислялись по формуле:

$$S = b \times h,$$

где b – ширина образца, мм; h – толщина образца, мм.

По результатам серии испытаний определяется погрешность величины предела прочности (доверительный интервал) по следующей формуле:

$$\Delta \bar{\sigma}_{сж} = t_{\alpha n} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_{сж} - \sigma_{сжi})^2}{n(n-1)}},$$

где n – число измерений; $t_{\alpha n}$ – коэффициент Стьюдента ($\alpha=0,95$).

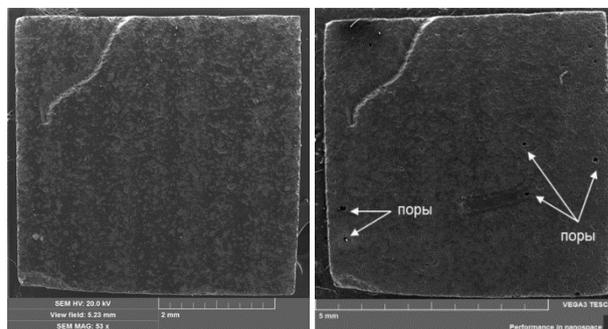
Окончательный результат величины предела прочности записываем в виде:

$$\sigma_{сж} = \bar{\sigma}_{сжi} \pm \Delta \bar{\sigma}_{сж}.$$

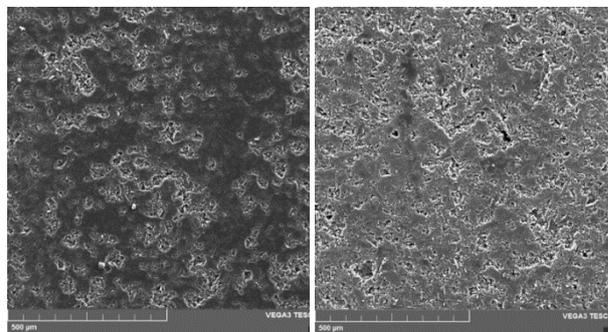
РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для анализа топографии поверхности проводилось сканирование 4-х граней образца (верхней, нижней и 2 боковых граней). При проведении сканирования поверхности образца ВОУ топлива выявлено, что изменения на поверхностях различных граней схожи.

В результате 100-кратного циклического воздействия температуры в диапазоне от 150 °С до 1130 °С на поверхности образцов происходят малозаметные изменения в виде увеличения доли существующей пористости и формирования единичных крупных пор (рисунки 2 и 3). Также зафиксировано уменьшение «эффекта полосатости» на поверхности образца, присущего механической обработке. Другие дефекты в виде трещин, формоизменения отсутствуют. Крупные поры диаметром до 0,2 мм формируются хаотично и в некоторых гранях образца практически отсутствуют.



а) до термоциклирования б) после термоциклирования



в) до термоциклирования г) после термоциклирования

Рисунок 2. Сравнительное изображение топографии поверхности грани образца ВОУ топлива

Анализ топографии поверхности образца НОУ топлива показал, что в результате 100 кратного циклического воздействия температуры в диапазоне от 150 °С до 1130 °С на поверхности материала НОУ топлива происходит неравномерное, направленное протекание коррозии межкристаллитного характера. А также обнаружено формоизменение образца после испытаний в виде закругления вершины и ребра. Вследствие протекания коррозии происходит сглаживание маркера, нанесённого царапанием на поверхности (рисунок 4).

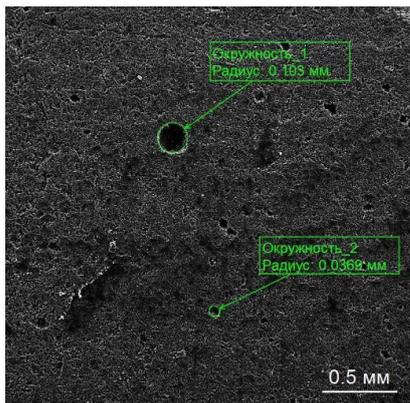
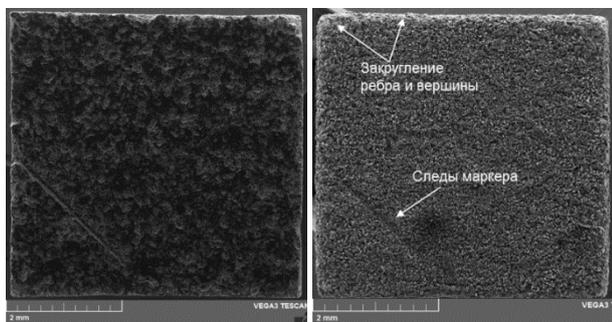
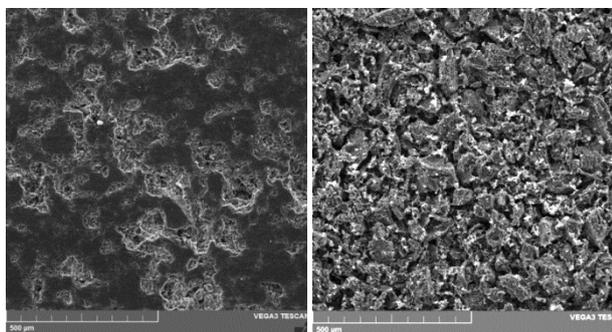


Рисунок 3. Изображение топографии поверхности образца ВОУ топлива с наблюдаемыми порами различных размеров



а) до термоциклирования б) после термоциклирования



в) до термоциклирования г) после термоциклирования

Рисунок 4. Сравнительное изображение топографии поверхности грани образца НОУ топлива

В процессе испытания образцов НОУ и ВОУ топлива на прочность регистрировались кривые сжатия «напряжение-деформация», которые приведены на рисунках 5 и 6 соответственно.

На рисунке 7 приведена гистограмма изменения предела прочности НОУ и ВОУ топлива после термоциклирования при температуре нагрева до 1000 °С. Изменение предела прочности материала ВОУ топлива в зависимости от количества циклов по сравнению с исходными значениями находится в пределах погрешности измерений. А пределы прочности НОУ топлива в тех же условиях испытания снизились до 19 %.

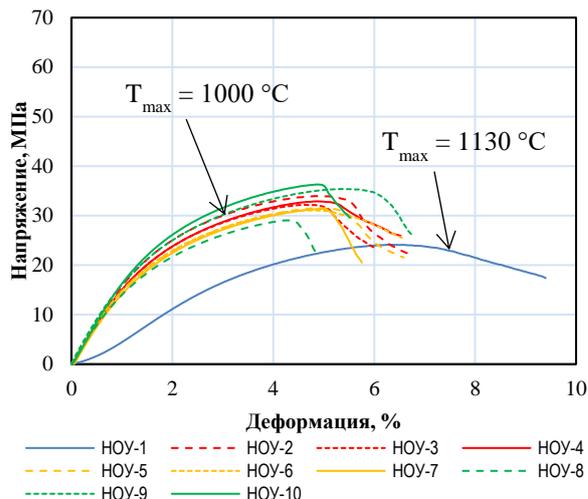


Рисунок 5. Диаграмма «напряжение-деформация» сжатия образцов НОУ

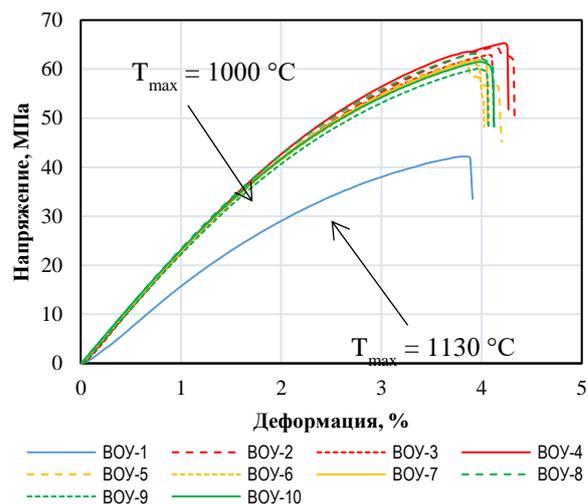


Рисунок 6. Диаграмма «напряжение-деформация» сжатия образцов ВОУ

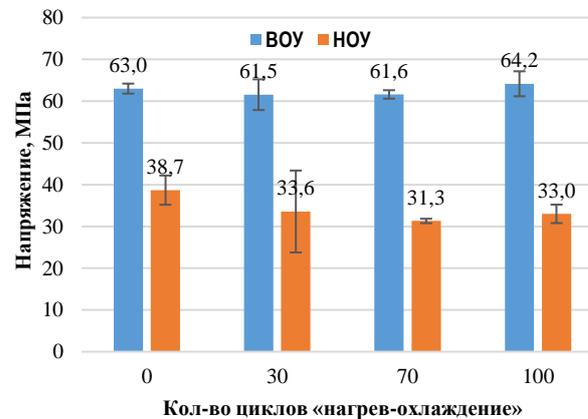


Рисунок 7. Изменение предела прочности НОУ и ВОУ топлива после термоциклирования при температуре нагрева до 1000 °С

На рисунке 8 приведена гистограмма изменения предела прочности НОУ и ВОУ топлива после термоциклирования при температуре нагрева до 1130 °С. Образцы НОУ и ВОУ топлива после испытания при температуре до 1130 °С претерпели снижение предела прочности до 38 % и 33 % соответственно.

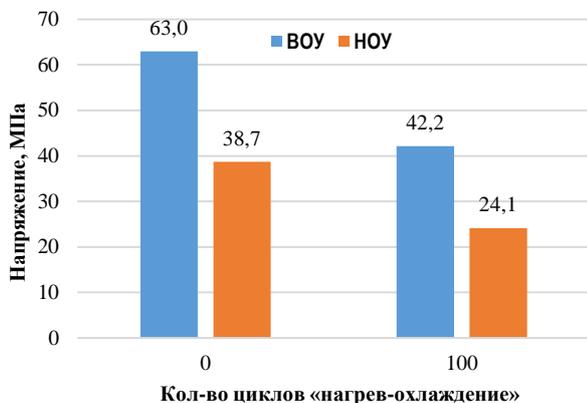


Рисунок 8. Изменение предела прочности НОУ и ВОУ топлива после термоциклирования при температуре нагрева до 1130 °С

Значительное снижение предела прочности НОУ и ВОУ топлива после термоциклирования при температуре 1130 °С связано с окислением образца, т.е. пары воды взаимодействуют с углеродом и происходит химическое распыление [7]. Также наибольшая потеря массы наблюдается в этих исследуемых образцах НОУ и ВОУ после термоциклирования при температуре 1130 °С (см. таблицу 3).

Также из работы [8] мы видим, что основная потеря прочности происходит на самых ранних стадиях окисления, когда пористость и проницаемость не изменились. Разрушение графита, как показано в работе [9], идет по коксу связующего, который образует мостики между зернами наполнителя, обеспечивающие спекание и прочность искусственного графита. Потеря прочности при окислении углеродных материалов в основном связана с выгоранием кокса (графита) связующего, потому что он более порист и

ЛИТЕРАТУРА

1. Конверсия высокообогащенного топлива исследовательского реактора в рамках международной инициативы / И. Вишнеvский¹, В. Слисенко, В. Боднар, И. Большинский, Дж. Дьюес, Н. Мазина, В. Макаровский // Вопросы атомной науки и техники. – 2013. – № 5. – С. 63–68. – рос.
2. Alexander Glaser, The Conversion of Research Reactors to Low-Enriched Fuel and the Case of the FRM-II, Science & Global Security, 10, no. 1, (2002): p. 61–79.
3. Anatoli S. Diakov, Prospects for Conversion of HEU-Fueled Research Reactors in Russia // Science and Global Security. – 2014. – №22. – p. 166–187.
4. N. Arhangelskii, Problems of the Research Reactors Conversion from HEU to LEU: History and Perspectives, Presentation at the Russian-American Symposium on the Conversion of Research Reactors to LEU, Moscow, 8–10 June 2011.
5. Акаев С.О., Диков А.С., Дикова Л.А., Кислицин С.Б., Ларионов А.С., Сатпаев Д.А. Высокотемпературные механические испытания реакторного графита и оксида бериллия // Вестник НЯЦ РК. – 2018. – № 4. – С. 40–42.
6. ГОСТ 23775-79 Изделия углеродные. Методы определения предела прочности на сжатие, изгиб, разрыв (диаметральное сжатие) // Юридическая фирма «Интернет и Право» URL: <http://internet-law.ru/gosts/gost/7929/> (дата обращения: 3.04.2019).
7. Thrower P.A., Bognet J.C., Mathew G.K. – Carbon, 1982. v. 20, № 6. p. 457–464.

имеет более высокую реакционную способность, а также экранирует зерна наполнителя от воздействия окисления. Разрушение указанных мостиков при окислении приводит к значительной потере прочности уже при малых потерях массы образца в целом [10].

Таблица 3. Изменение массы образцов ВОУ и НОУ топлива после термоциклирования

Температура, °С	Коли-во циклов «нагрев-охлаждение»	Вид топлива	Изменение массы Δm, %
1130 °С	100	ВОУ	3,48
		НОУ	8,35
1000 °С	30	ВОУ	0,20
		НОУ	0,18
	70	ВОУ	0,23
		НОУ	0,24
	100	ВОУ	0,25
		НОУ	0,21

Таким образом, для полноценного сравнения прочностных характеристик топливных материалов (ВОУ и НОУ) при коррозионном повреждении необходимо обратить внимание на состояние и доли компонентов (наполнитель, связующее и поры) и их вклад к потере прочности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных механических испытаний после термоциклирования при различных температурах и количестве циклов «нагрев-охлаждение» можно сделать следующие выводы:

Изменение предела прочности ВОУ топлива после 30, 70 и 100 циклов «нагрев-охлаждение» с максимальной температурой 1000 °С, не наблюдается. А предел прочности НОУ топлива в тех же условиях испытания снижается до 19 %.

Повышение температуры нагрева до 1130 °С приводит к заметному снижению прочности НОУ и ВОУ топлива: на 38 % и 33 % соответственно.

Снижение прочности уран-графитового материала связано с окислением, то есть с потерей массы.

8. Островский В.С. – Изд. АН СССР. Неорганические материалы, 1980, т. 16, № 2, С. 207–208.
9. Виргильев Ю.П., Барабанов В.Н. – Проблемы прочности, 1975. № 7. С. 96–100.
10. Искусственный графит. / В.С. Островский, Ю.С. Виргильев, В.И. Костиков, Н.Н. Шипков.– М.: Металлургия, 1986. – 272 с.

ИГР РЕАКТОРЫНЫҢ ТБУ ЖӘНЕ ЖБУ ОТЫНЫНЫҢ БЕРІКТІЛІК ҚАСИЕТТЕРІНЕ ТЕРМИЯЛЫҚ ЦИКЛ ПРОЦЕСТЕРІНІҢ ӘСЕРІ

Е.Д. Даулетханов, Е.Е. Сапатаев, Е.А. Кожакметов, Р.М. Мухамеджанова, А.Ж. Бельдеубаев, А.С. Уркунбай

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

Бұл жұмыста ИГР реакторының төмен байытылған уранды (ТБУ) және жоғары байытылған уранды (ЖБУ) отынының әртүрлі температура және цикл саны «қыздыру-суыту» бойынша термиялық циклдан кейінгі механикалық сынақ нәтижелері келтірілген. Термиялық сынақтардың режимінің тәуелділігіне байланысты ТБУ және ЖБУ отынының беріктілік қасиеттерінің өзгерісі анықталды.

Кілт сөздер: ИГР реакторы, термиялық циклдеу, қысу сынағы, беріктілік.

INFLUENCE OF THE THERMACYCLING PROCESS ON THE STRENGTH PROPERTIES OF THE LEU AND HEU FUEL OF IGR REACTOR

Ye.D. Dauletkhanov, Ye.Ye. Sapataev, Ye.A. Kozhakhmetov, R.M. Mukhamedzhanova, A.Zh. Beldeubaev, A.S. Urkunbay

Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

This article discusses the results of mechanical testing of highly enriched uranium (HEU) and low enriched uranium (LEU) fuel materials of the IGR reactor after thermal cycling at different temperatures and the quantity of “heating-cooling” cycles. The strength changes in characteristics of LEU and HEU fuel were determined depending on the thermal cyclic test modes.

Keywords: IGR reactor, thermocycling, compression test, strength.