

УДК: 53.082.1; 53.082.6

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ РЕАКТОРНОГО ГРАФИТА И ОКСИДА БЕРИЛЛИЯ

^{1,2)} Акаев С.О., ²⁾ Диков А.С., ²⁾ Дикова Л.А., ²⁾ Кислицин С.Б., ²⁾ Ларионов А.С., ^{1,2)} Сатпаев Д.А.

¹⁾ *Satbayev University, Алматы, Казахстан*

²⁾ *РГП «Институт ядерной физики» Министерства энергетики РК, Алматы, Казахстан*

E-mail: lexa_edji@mail.ru

В работе показаны результаты механических испытаний в широком температурном интервале реакторного графита и оксида бериллия. Установлено, что предел прочности графита с повышением температуры испытаний до 1000 °С возрастает на ~10 %, при этом хрупкий характер разрушения сохраняется.

Повышение температуры испытаний приводит к резкому снижению прочностных свойств BeO в ~10 раз. Как показали испытания на изгиб, с повышением температуры происходит смена механизма разрушения с хрупкого на хрупко-вязкий.

ВВЕДЕНИЕ

Конверсия реакторов на низкообогащённое топливо, строительство реакторов большой мощности, разработка ядерного топлива нового поколения и другие тенденции развития атомной энергетики диктуют необходимость совершенствования аппаратно-методического обеспечения исследовательских лабораторий, соответствующие условиям эксплуатации ядерных установок [1, 2]. В этой связи в Институте ядерной физики Республики Казахстан на базе реактора ВВР-К создается комплекс для испытаний и исследований конструкционных материалов и ядерного топлива [3]. Оборудование, входящее в состав комплекса, обеспечивает ресурсные испытания топлива, проведение реакторных испытаний конструкционных материалов на реакторную ползучесть и прочность, а также постоблучательные исследования структуры и свойств облученных материалов. В данной работе приведены результаты испытаний реакторного графита и оксида бериллия – материалов, широко используемых в реакторостроении [4].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве материалов для исследований нами выбраны реакторный графит и оксид бериллия ядерной чистоты. Выбор данных материалов обусловлен их широким применением как нейтронного отражателя и замедлителя нейтронов в реакторах различного типа [5].

Для исследований взят реакторный графит, марки МГ-1, плотностью 1734 кг/м³. Образцы вырезались из боковой части графитовых блоков размером 98×148 мм² на автоматическом фрезеровальном станке. Процесс изготовления образцов включал в себя несколько этапов. На первом этапе, поверхность боковой части графитового блока выравнивалась. Затем отрезалась заготовка – пластина с размерами, соответствующими размерам блока. После визуального контроля на наличие дефектов и разметки, из пластины вырезались образцы для исследований. Содержа-

ние основных примесей образцов графита приведены в таблице 1.

Таблица 1. Массовая доля основных примесей в образцах графита

Элемент	Массовая доля, ×10 ⁻³ %
Fe	16
Mn	0,14
Cu	0,13
Cr	1
Ni	1,4
B	0,1

Образцы оксида бериллия изготавливались из пластины, полученной изостатическим прессованием порошка BeO со следующими характеристиками: BeO ядерной чистоты т.е. содержание BeO ≥ 99,5 вес. %; – сумма оксидов примесей (Mn, Ni, Fe, Ca, Si, Mg, Cu, Al, Zn, Cr, Na) ≤ 0,5 вес. % [6]. Объемная концентрация примесей в исследуемых образцах приведена в таблице 1.

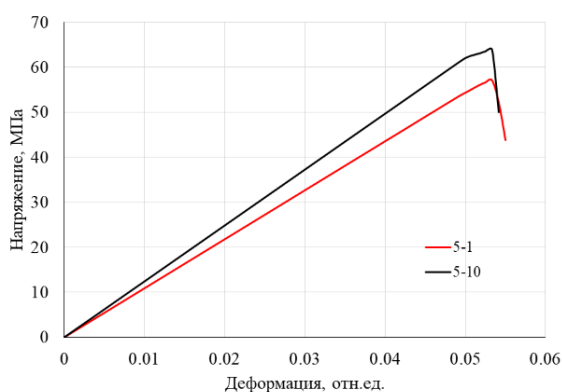
Таблица 2. Содержание примесей в образцах BeO

Элемент	Концентрация примесей, ×10 ⁻³ %
Si	170
Mg	100
Al	10
Ca	5
Fe	3,5
K	3
Na	2
Ti	1
Zn	1
Cr	1
Ni	0,5
Mn	0,5
Cu	0,5

Для выявления влияния высоких температур на прочность материалов проведены испытания на сжатие и трехточечный изгиб. Испытания проводились в среде гелия при комнатной температуре и при 1000 °С. Для испытаний на изгиб использовались образцы размером 0,005×0,005×0,035 м³. Образцы для испытаний на сжатие имели форму куба с размерами граней 0,005 м³. Скорость перемещения подвижной траверсы составляла 1 мм/мин.

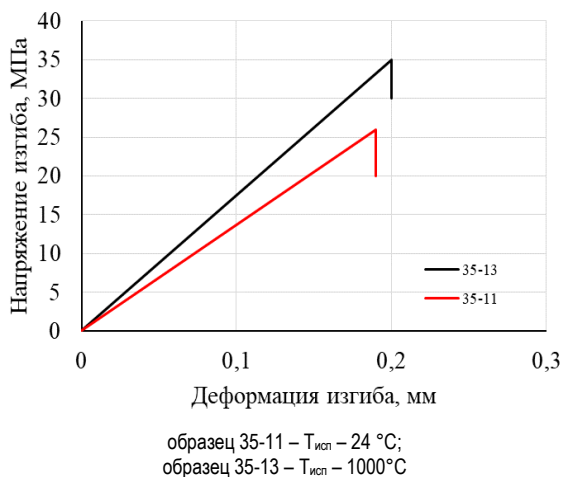
РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунках 1 и 2 показаны результаты испытаний образцов графита на сжатие и изгиб при комнатной и температуре 1000 °С. Из диаграмм испытаний видно, что с повышением температуры происходит увеличение предела прочности графита на сжатие.



образец 5-1 – испытан при комнатной температуре;
образец 5-10 – испытан при температуре 1000 °С.

Рисунок 1. Диаграмма испытаний на сжатие образцов реакторного графита плотностью 1734 кг/м³ при разных температурах



образец 35-11 – T_{исп} – 24 °С;
образец 35-13 – T_{исп} – 1000°С

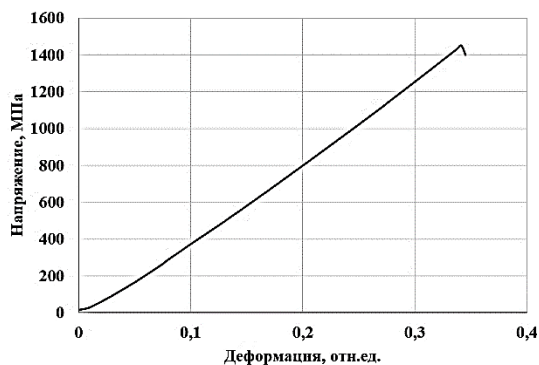
Рисунок 2. Диаграммы испытаний на трехточечный изгиб образцов реакторного графита плотностью 1734 кг/м³ при разных температурах

Пропорциональное изменение напряжений и деформации образца с последующим его разрушением, наблюдаемое на диаграмме сжатия, свидетельствует о хрупком характере разрушения. Предел прочности

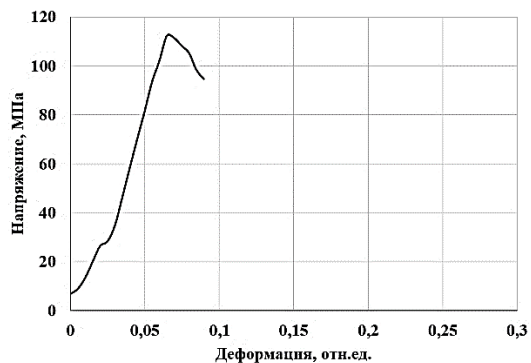
образцов реакторного графита при испытаниях на сжатие для комнатной температуры составляет 56±1 МПа, для образцов, испытанных при температуре 1000 °С, значение составляет 64±1 МПа.

Как и при испытаниях на сжатие, испытания на изгиб при 1000 °С показали некоторое увеличение механических характеристик реакторного графита. Значение напряжения изгиба, полученное при комнатной температуре испытаний, составляет 26±1 МПа, при температуре 1000 °С равно 35±1 МПа. Согласно [4] и [7] повышение прочностных характеристик с увеличением температуры вплоть до 2500 °С характерно для графитных материалов. Такое явление может быть связано со снижением влияния внутренних напряжений, возникающих в местах структурных неоднородностей, в том числе в порах при проявлении ресурса пластичности графита.

На рисунке 3 показаны инженерные диаграммы, полученные в результате кратковременных механических испытаний на сжатие образцов ВеО. Как видно, с повышением температуры испытаний от 24 до 1000 °С наблюдается снижение предела прочности ВеО. Предел прочности образцов ВеО при испытаниях на сжатие для комнатной температуры составляет 1450±2 МПа, для образцов, испытанных при температуре 1000 °С, значение составляет 105±1 МПа.



а) T_{исп} – 24 °С

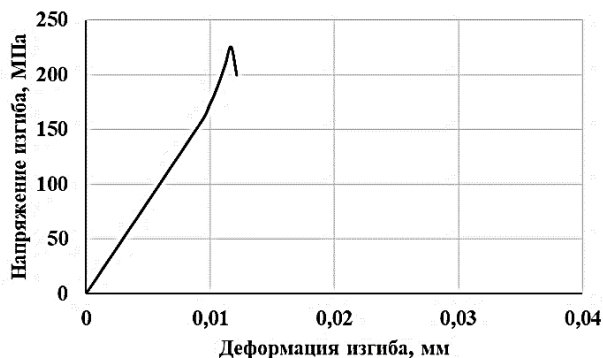


б) T_{исп} – 1000 °С

Рисунок 3. Диаграммы испытаний образцов ВеО на сжатие

Разупрочнение оксида бериллия, по-видимому, связано с перераспределением межкристаллитных примесных соединений по границам зерен BeO при высоких температурах [8]. В этой работе было установлено, что сегрегация примесей приводит к снижению теплопроводности и механической прочности BeO в процессе обжига изделий.

Диаграммы испытаний образцов BeO на изгиб показаны на рисунке 4.



а) $T_{исп} - 24 \text{ }^{\circ}\text{C}$



б) $T_{исп} - 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Рисунок 4. Диаграммы изгиба образцов BeO

Повышение температуры испытаний приводит к снижению предела прочности при изгибе. Значение напряжения изгиба, полученное при комнатной температуре испытаний, составляет 225 ± 3 МПа, при температуре $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ равно 49 ± 3 МПа. На диаграмме испытаний при $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (рисунок 3, б) наблюдается участок текучести, после которого следует резкий рост напряжений, приводящий к разрушению образца.

Наличие на диаграмме изгиба участков, параллельных оси ординат, свидетельствует о появлении и распространении трещины в некоторой части сечения образца [9].

Участок резкого повышения напряжений, приводящего к разрушению образцов, свидетельствует о смене механизма разрушения с вязкого на хрупкий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных испытаний в широком температурном интервале от комнатной до $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ можно сделать следующие выводы:

Предел прочности графита с повышением температуры испытаний до $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ возрастает на $\sim 10 \%$, при этом хрупкий характер разрушения сохраняется.

Повышение температуры испытаний приводит к резкому снижению прочностных свойств BeO в ~ 10 раз. Как показали испытания на изгиб с повышением температуры происходит смена механизма разрушения с хрупкого на хрупко-вязкий. Поскольку оксид бериллия широко используется в качестве отражателя нейтронов, это обстоятельство следует принимать во внимание при использовании его в высокотемпературных реакторах.

По полученным результатам можно заключить, что создаваемый комплекс соответствует задачам по испытаниям высокооблученных конструкционных и топливных материалов в широком диапазоне температур.

Работа выполнена в рамках программы целевого финансирования Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан № BR05236400.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аринкин Ф.М., Шаймерденов А.А., Гизатулин Ш.Х., Дюсамбаев Д.С., Колточник С.Н., Чакров П.В., Чекушина Л.В. Конверсия активной зоны исследовательского реактора ВВР-К. – Атомная энергия, 2017, т. 123, № 1 – с. 15–20.
2. Звонарев Ю.А., Мельников И.А., Киреева А.Н. Расчетный анализ эффективности применения топлива ATF с повышенной устойчивостью к авариям для ВВЭР-1200 // Новые материалы: толерантное ядерное топливо: Материалы 16-ой международной школы-конференции для молодых ученых и специалистов. Москва, 29 октября – 2 ноября 2018 г., М.: НИЯУ МИФИ, 2018, – 156 с.
3. Диков А.С., Гизатулин Ш.Х., Кислицин С.Б., Ларионов А.С. и др. Комплекс для испытаний облученных конструкционных материалов и ядерного топлива. // Новые материалы: Толерантное ядерное топливо: Материалы 16-ой международной школы-конференции для молодых ученых и специалистов. Москва, 29 октября – 2 ноября 2018 г., М.: НИЯУ МИФИ, 2018, – С. 51–52.
4. Калинин Б.А., Платонов П.А., Тузов Ю.В., Чернов И.И. и др. Физическое материаловедение: Учебник для вузов: В 7 т. / Под общей ред. Б.А. Калина / – Том 6. Конструкционные материалы ядерной техники – М.: МИФИ, 2012. – 736 с.
5. Материалы ядерных энергетических установок: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат. 1987. – 408 с.
6. Матясова В.Е., Коцарь М.Л., Кочубеева С.Л., Никонов В.И. Получение бериллиевых материалов для ядерной и термо-ядерной энергетики из бериллийсодержащих отходов // ВАНТ: Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2013. – №2(84). – С. 110-117.

7. Углеродистые материалы: справочник / Э. Н. Мармер. – М.: Металлургия, 1973. – 136 с.
8. Беляев Р.А, Шалимова И.Ф. и др. Влияние добавок на теплопроводность оксида бериллия // Огнеупоры. 1975.– № 2.– С. 51–53.
9. Курс сопротивления материалов с примерами и задачами: учеб. пособие / В. И. Водопьянов, А. Н. Савкин, О. В. Кондратьев; ВолГТУ. – Волгоград, 2012. – 136 с.

РЕАКТОРЛЫҚ ГРАФИТ ПЕН БЕРИЛЛИЙ ОКСИДІН ЖОҒАРЫ ТЕМПЕРАТУРАЛЫ МЕХАНИКАЛЫҚ СЫНАУ

^{1,2)} С.О. Акаев, ²⁾ А.С. Диков, ²⁾ Л.А. Дикова, ²⁾ С.Б. Кислицин, ²⁾ А.С. Ларионов, ^{1,2)} Д.А. Сәтпаев

¹⁾ *Satbayev University, Алматы, Қазақстан*

²⁾ *ҚР Энергетика министрлігінің «Ядролық физика институты» РМК, Алматы, Қазақстан*

Жұмыста реакторлық графит пен бериллий тотығын ауқымды температуралық аралықта механикалық сынақтау нәтижелері көрсетілген. Сынақ өткізу температурасының 1000 °С-қа дейін артуымен бірге графиттің беріктік шегі ~10 %-ға өсетіні анықталды, бұл ретте морт бұзылу сипаты сақталады. Сынақ өткізу температураларын арттыру BeO беріктік қасиеттерінің ~10 есеге күрт төмендеуіне алып келеді. Иілімге арналған сынақтардан көрінетіндей, температура артқан сайын морт бұзылу механизмі морт-тұтқыр бұзылу механизміне ауысады.

HIGH-TEMPERATURE MECHANICAL TESTS OF REACTOR GRAPHITE AND BERYLLIUM OXIDE

^{1,2)} S.O. Akayev, ²⁾ A.S. Dikov, ²⁾ L.A. Dikova, ²⁾ S.B. Kislitsin, ²⁾ A.S. Larionov, ^{1,2)} D.A. Satpaev

¹⁾ *Satbayev University, Almaty, Kazakhstan*

²⁾ *RSE "Institute of Nuclear Physics" under the Ministry of Energy of the RK, Almaty, Kazakhstan*

This paper shows the results of mechanical tests in a wide temperature range of reactor graphite and beryllium oxide. It is established that the compressive strength of graphite with increasing temperature test up to 1000 °C increases by ~10 %, while the fragile nature of the destruction is preserved. An increase in the test temperature leads to a sharp decrease in the strength properties of BeO by ~10 times. As shown by bending tests with increasing temperature, the destruction mechanism changes from brittle to brittle-viscous.