

УДК 546.831.4

ОСОБЕННОСТИ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКОГО И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО РАСЧЕТОВ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА $(Zr,U)N$, ПОЛУЧЕННОГО С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОДХОДА ОКИСЛИТЕЛЬНОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ

© 2022 г. Д. П. Шорников^{1, 2}, И. А. Ковалев^{1, *}, А. В. Тенишев², Б. А. Тарасов^{1, 2},
А. В. Шокодько¹, А. И. Огарков¹, С. С. Стрельникова¹, А. С. Чернявский¹, К. А. Солнцев¹

¹Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук,
Ленинский пр., 49, Москва, 119334 Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Каширское ш., 31, Москва, 115409 Россия

*e-mail: vankovalskij@mail.ru

Поступила в редакцию 14.12.2021 г.

После доработки 03.02.2022 г.

Принята к публикации 04.02.2022 г.

Нитридизацией твердых растворов урана в цирконии синтезированы нитриды $Zr_{1-x}U_xN$. В ходе высокотемпературного насыщения твердых растворов азотом образуется керамика $Zr_{1-x}U_xN$ с повышенной концентрацией урана в центральной области образца. На основе $Zr_{1-x}U_xN$ представлена концепция нового вида топлива для высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов. Проведен нейтронно-физический расчет активной зоны, показана возможность достижения критической массы при содержании урана 10 и 20 мас. %. Определены габариты активной зоны концептуального реактора. Проведен теплофизический расчет активной зоны реактора, показана возможность получения высокопотенциального тепла.

Ключевые слова: $Zr_{1-x}U_xN$, ядерное топливо, реактор, ТВЭЛ, нитридизация

DOI: 10.31857/S0002337X22050098

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, согласно концепции Generation IV, основой ядерной энергетики будущего станут шесть реакторов. Особый интерес представляют быстрый газовый реактор (Gas-Cooled fast reactor) и высокотемпературный газовый реактор (Very-High Temperature reactor). В том или ином виде они представляют собой дальнейшее развитие газографитовых реакторов типа высокотемпературного газоохлаждаемого реактора (ВТГР) (США) и AVR (ФРГ). Эти реакторы представляют повышенный интерес как источник высокопотенциального тепла (до 1000°C) для металлургических и теплофизических производств. В отличие от водо-водяного энергетического реактора (ВВЭР) и реактора на быстрых нейтронах (БН) такие реакторы имеют несколько упрощенную тепловую схему и обладают повышенным КПД. Основой газографитовых реакторов является собой реаквальное топливо, которое представляет собой гранулы диоксида (реже карбида) урана с нанесенными на них покрытиями из пироуглерода и карбида кремния. Покрытия призваны исключить выход продуктов деления в газовый тепло-

носитель. Топливные гранулы размещены в графитовой матрице, из которой затем изготавливают стержни (концепция ВТГР) или шары (концепция AVR). Несмотря на уникальные характеристики, такой вид топлива обладает рядом серьезных недостатков, в частности, за счет наличия неделящейся матрицы приходится повышать обогащение топлива, технология изготовления гранул и покрытий на них достаточно сложна и полностью не исключает выход продуктов деления. При повышенных выгораниях наблюдается “амебный” эффект, когда топливные гранулы мигрируют к поверхности топливного элемента. Попытка ухода от микроТВЭЛОВ и использование ТВЭЛОВ с развитой поверхностью теплосъема не позволяют достичь необходимых высоких температур [1–5].

Для решения некоторых из обозначенных проблем высокотемпературных реакторов предложена концепция ухода от дисперсного топлива и применения в качестве ТВЭЛОВ тонких пластин. Очевидно, что применение металлов и сплавов невозможно из-за высокой температуры, поэтому принято решение использовать тонкие керамические пластины. Чтобы достигнуть высокой

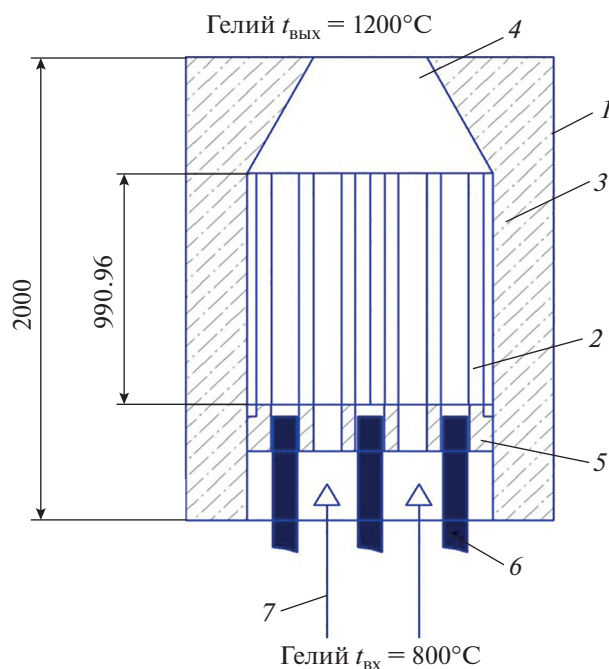


Рис. 1. Схематичный разрез активной зоны газового реактора: 1 – тепловыделяющая сборка (ТВС); 2 – ТВС с каналом для регулирующего стержня; 3 – биологическая защита; 4 – верхний свод, выход нагретого газа; 5 – опорная плита из жаропрочного сплава; 6 – стержни регулирования и аварийной защиты; 7 – вход теплоносителя из газодувки.

температуры теплоносителя, увеличив поверхность теплопередачи, было предложено создать из керамического топлива структуру, через которую свободно проходит газовый теплоноситель. Схема активной зоны приведена на рис. 1 и 2.

В качестве топливного материала предложено использование керамики на основе нитрида урана [6, 7]. Топливные элементы представляют собой тонкостенные сотовые керамические блоки, создать которые традиционными технологиями спекания порошков очень сложно, поэтому авторы использовали подход окислительного конструирования [8–13]. Нитридную керамику создавали нитридизацией твердых растворов урана в цирконии $Zr(U)$, где доля урана варьировалась в пределах 5–30 мас. %. Сплав прокатывали, гофрировали, изготавливали металлические заготовки, которые после диффузионного сваривания нитридизовали в атмосфере азота при высокой температуре. Керамика $Zr_{1-x}U_xN$ повторяла форму исходной металлической заготовки.

В основу концепции положен ВТГР с призматическими ТВЭЛами. ТВЭЛы представляют из себя полые шестигранные трубы с размером под “ключ” 200 мм, в которых размещены тепловыделяющие пластины. В качестве теплоносителя используется гелий, температура на входе 800–

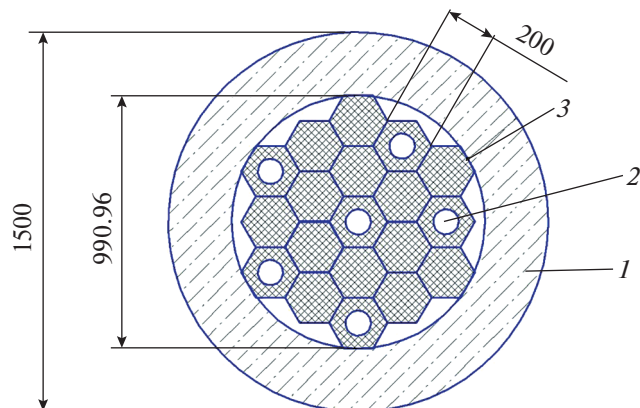


Рис. 2. Вид сверху на активную зону реактора: 1 – отражатель, 2 – ТВС с отверстием под стержень системы управления и защиты (СУЗ), 3 – штатная ТВС.

1000°C, на выходе – 1200–1500°C. Тепловая схема одноконтурная. Регулирование осуществляется стержнями из карбида бора или гафната диспрозия.

На рис. 3 приведен пример ТВС с пластинчатыми ТВЭЛами из твердого раствора $Zr_{1-x}U_xN$ с покрытием из ZrN .

В шестигранной ТВС расположены пластинчатые ТВЭЛы в количестве от 17 штук, толщина до 1.5 мм. Пластина ТВЭЛ представляет из себя сердечник из композиции $Zr_{1-x}U_xN$ и оболочку ZrN . Сердечник и оболочка изготовлены из сплавов $Zr-U$ и Zr соответственно, между ними достигается плотный диффузионный контакт, после чего осуществляется азотирование. Возможна любая геометрия расположения пластин, теплообмен осуществляется гелием или водородом.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Нейтронно-физический расчет концептуального реактора. Проведены предварительные исследования нейтронно-физических характеристик для ТВЭЛов из топливной композиции $Zr_{1-x}U_xN$ с помощью программы расчета методом Монте-Карло MCU-PTR. При расчетах было решено уйти от простой пластинчатой геометрии и провести оценку более сложной структуры, которая представляет из себя композицию из плоской и гофрированной лент. Профиль гофрированной ленты имеет вид равносторонних треугольников. Геометрия ТВЭЛов изображена на рис. 4а. Оболочка ТВЭЛов не учитывалась.

В табл. 1 приведены характеристики топливных композиций.

Рассчитаны коэффициенты размножения нейтронов для бесконечной среды из вышеописанных

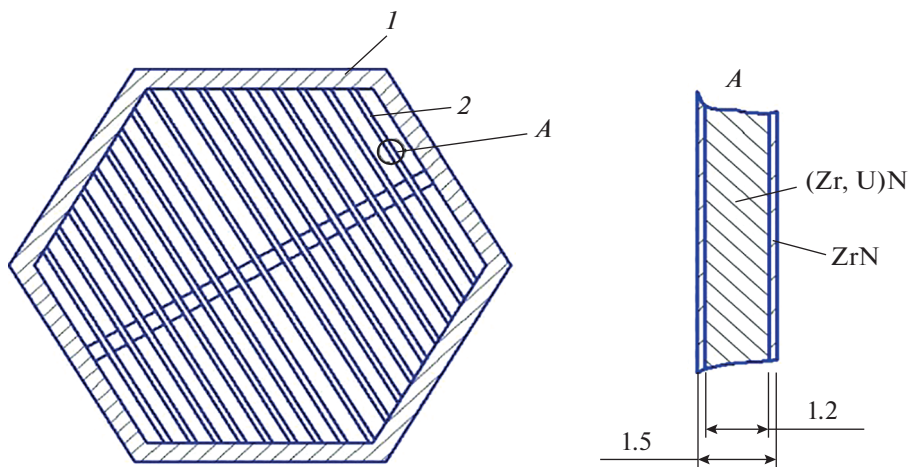


Рис. 3. Конструкция ТВЭ высокотемпературного реактора: 1 – кожух ТВЭ (молибден, ванадиевый сплав, нитрид титана или циркония), 2 – пластинчатый ТВЭЛ; А – поперечное сечение пластинчатого ТВЭЛа.

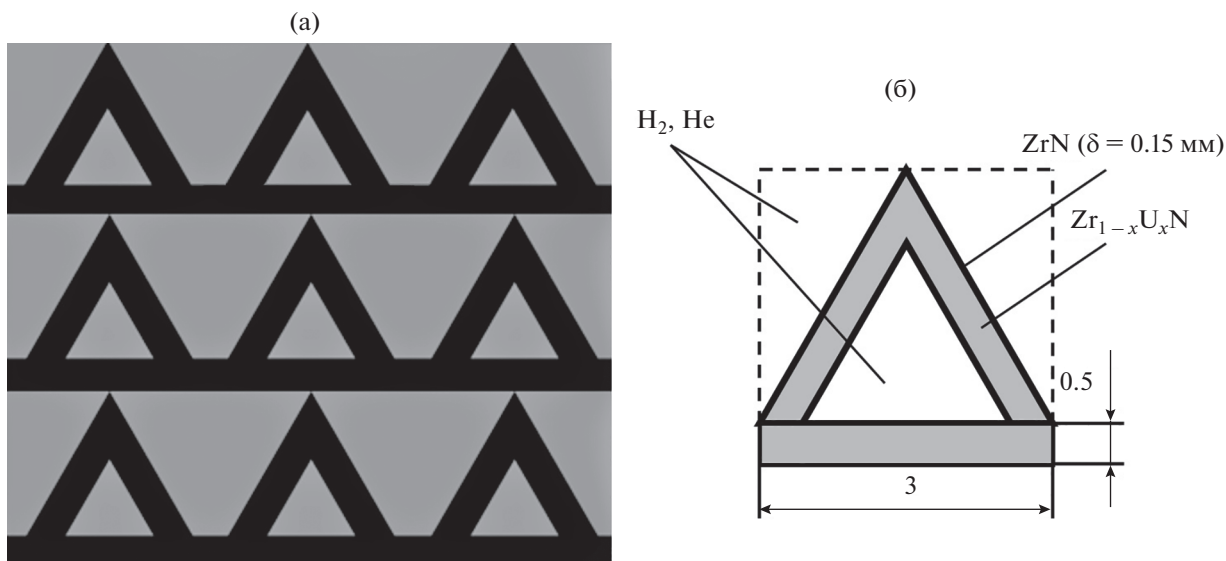


Рис. 4. Геометрия ТВЭЛов с топливной композицией $Zr_{1-x}U_xN$ (горизонтальное сечение) (а); элементарная ячейка газового реактора (б).

ТВЭЛов (табл. 2). Расчет проведен для температуры 300 К.

Оценена чувствительность коэффициента размножения нейтронов в бесконечной среде k_{inf} к концентрациям Zr и N ($\Delta k/k$ – относительное изменение коэффициента размножения). Коэффициент чувствительности k_{inf} к концентрации Zr составляет -8.19×10^1 ($\% \Delta k/k$)/(ат./барн см)). Коэффициент чувствительности k_{inf} к концентрации N составляет -2.16×10^2 ($\% \Delta k/k$)/(ат./барн см)). То есть при изменении концентрации Zr и N на 10% коэффициент k_{inf} изменится на $0.4\% \Delta k/k$ и $1.0\% \Delta k/k$ соответственно.

Для варианта Zr–10 мас. % U оценен коэффициент размножения для бесконечной в горизонтальной плоскости решетки ТВЭЛов при различной высоте активной зоны (без торцевых отражателей):

$$\begin{aligned} \text{Высота } 100 \text{ см} - k_{eff} &\sim 0.95, \\ 150 \text{ см} - k_{eff} &\sim 1.15, \\ 200 \text{ см} - k_{eff} &\sim 1.25. \end{aligned}$$

Следует отметить, что рассматриваемая система является практически гомогенной. Значение k_{inf} с объемными долями $Zr_{1-x}U_xN$ 0.429, водорода 0.571 отличается от гетерогенного варианта ме-

Таблица 1. Характеристики топливных композиций

Содержание U в сплаве UZr, мас. %	10	20
Плотность UZr, г/см ³	8.3	7.8
Плотность U в UZr, г/см ³	1.66	0.78
Обогащение по ²³⁵ U, %	90	90
Теплоноситель	H ₂	H ₂
Ядерная концентрация*, ат./((барн см)		
²³⁵ U	3.828 × 10 ⁻³	1.7986 × 10 ⁻³
²³⁸ U	4.199 × 10 ⁻⁴	1.973 × 10 ⁻⁴
Zr	4.3942 × 10 ⁻²	4.6456 × 10 ⁻²
N	4.3942 × 10 ⁻²	4.6456 × 10 ⁻²
H	5.412 × 10 ⁻⁵	5.4121 × 10 ⁻⁵

* Число атомов (ядер) элемента в 1 см³ композиции.

нее чем на 0.1%Δk/k; k_{eff} – эффективный коэффициент размножения нейтронов.

На основании результатов расчета установлено, что предложенная конструкция реактора позволяет достичь реактивности при указанных геометрических размерах активной зоны реактора. При использовании боковых и торцевых отражателей удастся снизить размер активной зоны примерно в два раза.

Теплофизический расчет канала газового реактора. Теплофизический расчет канала предложенного в данной работе реактора осуществлялся для определения максимальной температуры топливной композиции в элементарной ячейке, максимальной температуры оболочки и расхода охлаждающего газа. Элементарная ячейка реактора представляет из себя периодическую треугольную структуру (рис. 4б), охлаждаемую газообразным гелием или водородом. Топливо Zr_{1-x}U_xN заключено в оболочку из ZrN. Размеры активной зоны взяты с учетом использования отражателя и составляют 0.5 × 0.5 м.

Исходные данные для проведения расчета представлены в табл. 3.

Число каналов в активной зоне определяли через отношение площади активной зоны к площади одной ячейки

Таблица 2. Результаты расчета по программе MCUPTR

Состав композиции	Zr–20 мас. % U	Zr–10 мас. % U
k_{inf}	1.5776	1.3690
Δk/k, %	27.0	36.6

$$N_{кан} = \frac{\pi D^2}{2\sqrt{3}a^2}, \quad (1)$$

где $a = 3$ мм – шаг решетки.

Объемное энерговыделение в активной зоне определяли по формуле

$$q_V = \frac{Q_{тепл}}{V_{тепл}} = 3.58 \times 10^6 \text{ Вт/м}^3. \quad (2)$$

Данное значение характерно для газоохлаждаемых реакторов.

Расход теплоносителя через активную зону рассчитывали по формуле

$$G_{a.з} = \frac{Q_{тепл}}{c_{газ}(t_{вых} - t_{вх})}, \quad (3)$$

где $c_{газ}$ – средняя удельная теплоемкость газа-теплоносителя в интервале температуры от $t_{вх}$ до $t_{вых}$. Согласно (3), расход водорода через активную зону составил 13 г/с, гелия – 38 г/с.

Эффективная высота активной зоны представляет собой гипотетическую высоту, у которой на нижней и верхней границах тепловыделение в топливе обращается в ноль. Величину распределения энерговыделения по высоте определяли из уравнения

$$K_z = \frac{H_{a.з}}{\int_{-H_{a.з/2}}^{H_{a.з/2}} \cos\left(\frac{\pi z}{H_{эф}}\right) dz}. \quad (4)$$

Эффективная высота активной зоны $H_{эф} = 0.458$ м. Распределение энерговыделения описывается тригонометрической зависимостью. Для наиболее энергонапряженного (центрального) канала справедлива запись

Таблица 3. Исходные данные для расчета газового реактора

Температура газа на входе в активную зону, °С	$t_{\text{вх}}$	1000
Температура газа на выходе из активной зоны, °С	$t_{\text{вых}}$	1500
Давление в активной зоне, МПа	$p_{\text{а.з}}$	10
Тепловая мощность, кВт	$Q_{\text{тепл}}$	100
Высота активной зоны, м	$H_{\text{а.з}}$	1.4
Диаметр активной зоны, м	$D_{\text{а.з}}$	1.5
Шаг решетки, мм	a	3
Толщина ТВЭЛа, мм	δ	0.5
Толщина оболочки ТВЭЛа, мм	$\delta_{\text{об}}$	0.15
Коэффициент неравномерности энерговыделения по высоте	K_z	1.4
Коэффициент неравномерности энерговыделения по радиусу	K_r	1.4

$$q_{l \text{ центр}}(z) = \frac{Q_{\text{тепл}} K_r K_z}{H_{\text{а.з}} N_{\text{кан}}} \cos\left(\frac{\pi z}{H_{\text{эф}}}\right). \quad (5)$$

Распределение температуры теплоносителя (газа) по высоте наиболее энергонапряженного канала описывается уравнением

$$t_{\text{газ}}(z) = t_{\text{вх}} + \frac{N_{\text{яч}} \int_{-H_{\text{а.з}/2}^{H_{\text{а.з}/2}} \frac{Q_{\text{тепл}} K_r K_z}{H_{\text{а.з}} N_{\text{кан}}} \cos\left(\frac{\pi z}{H_{\text{эф}}}\right) dz}{G_{\text{а.з}} c_{\text{газ}}}. \quad (6)$$

Наибольшая температура теплоносителя достигается на выходе из центрального канала и составляет $\sim 1700^\circ\text{C}$ для водорода и для гелия. Совпадение значений объясняется близостью теплофизических свойств данных газов при расчетных температурах и давлениях.

При расчете температурного режима ТВЭЛа принято допущение, что в поперечном сечении канала температура газа остается постоянной. Коэффициент теплоотдачи определяли с помощью выражения

$$\alpha = \frac{(0.22 Re^{0.8} Pr^{0.6}) \lambda_{\text{газ}}}{d_{\text{гидр}}}, \quad (7)$$

где $\lambda_{\text{газ}}$ — средняя теплопроводность газа, $Re = u_0 d_{\text{газ}} / \nu_{\text{газ}}$ — число Рейнольдса, u_0 — скорость протекания газа в канале, $\nu_{\text{газ}}$ — средняя кинематическая вязкость газа, $d_{\text{гидр}} = 4S_{\text{прох}} / P_{\text{смоч}}$ — гидравлический диаметр газа, вычисляемый через отношение проходного сечения канала к его смоченному газом периметру.

По результатам вычислений коэффициент теплоотдачи составил $18.7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ для водорода и $19.5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ для гелия.

Максимальная температура топлива достигается на равном удалении от обеих поверхностей обо-

лочки внутри ТВЭЛа. Оценим термические сопротивления стенки ТВЭЛа (8) и половины толщины топливной части (9):

$$r_{\text{об}} = \frac{\delta_{\text{стенки}}}{\lambda_{\text{ZrN}}} = \frac{0.15 \times 10^{-3}}{27.2} = 5.5 \times 10^{-6} \text{ м}^2 \text{ К}/\text{Вт}, \quad (8)$$

$$r_{\text{т}} = \frac{\delta_{\text{т}}}{\lambda_{\text{(UZr)N}}} = \frac{0.1 \times 10^{-3}}{25} = 4 \times 10^{-6} \text{ м}^2 \text{ К}/\text{Вт}. \quad (9)$$

Наибольшие перепады температуры в оболочке и топливе могут быть достигнуты в местах наибольшего теплового потока. Перепады температур в оболочке и топливе в центральном сечении канала:

$$\Delta t_{\text{об}} = \frac{q_{l \text{ центр}}(0)}{a} r_{\text{об}} = 0.036^\circ\text{C}, \quad (10)$$

$$\Delta t_{\text{т}} = \frac{q_{l \text{ центр}}(0)}{a} r_{\text{т}} = 0.026^\circ\text{C} \quad (11)$$

пренебрежимо малы, и температура в центре топлива сопоставима с температурой теплоносителя. Таким образом, максимальная температура и топлива, и оболочки равна 1700°C . Результаты теплофизического расчета сведены в табл. 4.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для проверки заявленной концепции ухода от дисперсного топлива и применения в качестве ТВЭЛов тонкостенных керамических блоков из тугоплавкой керамики с развитой поверхностью теплосъема были изготовлены модельные фрагменты керамических блоков. Керамику получали нитридизацией твердых растворов урана в цирконии с разным содержанием урана (5 и 10 мас. %). Методику нитридизации изучали на имитаторах — цирконии и титане, а затем использовали при

Таблица 4. Результаты теплофизического расчета

Теплоноситель	Водород	Гелий
Объемное энерговыделение, Вт/м ³	3.58 × 10 ⁶	
Число каналов, шт.	25180	
Максимальная температура теплоносителя, °С	~1700	
Максимальная температура оболочки, °С	~1700	
Максимальная температура топлива, °С	~1700	
Расход теплоносителя через активную зону, кг/с (л/с)	13 × 10 ⁻³ (7.06)	38 × 10 ⁻³ (10.33)
Скорость протекания теплоносителя, м/с	0.04	0.05
Коэффициент теплоотдачи к теплоносителю, Вт/(м ² К)	19.5	18.7

синтезе нитридов твердых растворов циркония с 5 и 10 мас. % урана.

Шихту из 5 мас. % гранул обедненного металлического урана и 95 мас. % йодидного циркония плавляли в дуговой печи МИФИ 9.3 в слиток длиной 49 и диаметром 8 мм. Для приготовления сплава брали 18.479 г циркония и 0.977 г урана, масса слитка после плавки составляла 19.439 г, потеря массы – менее 0.09%. Образец травили в растворе 50 об. % азотной и 50 об. % плавиковой кислот для удаления оксидного слоя и отжигали в вакуумной печи сопротивления при температуре 1000°С в течение 1 ч. Плотность сплава Zr–5 мас. % U, измеренная пикнометрическим методом, составила 6.214 г/см³. Анализ микроструктуры проводили на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOL 6610 LV. Морфология поверхности литого и отожженного слитков представлена на рис. 5.

Слиток помещали в алюминиевую фольгу для исключения окисления, нагревали в индукторе до температуры 800–900°С и проковывали в пластину толщиной около 3 мм. Послековки образец прокатывали до толщины 1.76 мм, отжигали в процессе нагрева до 900°С (выше температуры фазового перехода циркония) без изотермической выдержки. После этого образец снова прокатывали до толщины 1.02 мм.

Из РЭМ-изображений видно, что в ходе плавки удается сохранить заданный состав, содержание циркония варьируется от 95.5 до 95.6, а содержание урана – от 4.35 до 4.45 мас. %.

Микрорентгеноспектральным анализом установлено равномерное распределение циркония и урана. Это связано с особенностями кристаллизации данного твердого раствора, который представляет собой перитектику, состоящую из матрицы чистого циркония и δ-фазы. Особенностью перитектики является равномерное распределение элементов в объеме материала.

На рис. 5б представлено РЭМ-изображение поверхности прокатанного твердого раствора. Элементным анализом установлено, что в ходе плавки содержание урана снижается от 4.35 до 3.58 мас. %.

Нитридизацию твердого раствора Zr–U проводили в атмосфере азота при температуре 1800°С. Морфология поверхности керамики представлена на рис. 5в. По результатам анализа установлено, что концентрация урана на поверхности образца несколько снижается и составляет около 1.6–3.0 мас. %. Снижение концентрации урана в приповерхностных областях можно объяснить его частичным испарением с поверхности за счет высокой упругости насыщенного пара при температуре нитридации и одновременной миграцией урана в центр образца при образовании нитрида циркония.

Для исследования нитридации твердых растворов на основе Zr изготовливали фольгу, содержащую 10 и 20 мас. % U. После плавки шихты в дуговой печи слиток проковывали и прокатывали в пластины толщиной 0.3–1.0 мм. Затем пластины сплава с двух сторон покрывали циркониевой фольгой толщиной 0.1 мм и прокатывали пакет, обеспечивая плотное диффузионное сцепление между цирконием и сплавом Zr(U). Далее пластины гофрировали, собирали в форму ТВЭЛа, проводили диффузионное сваривание в вакуумной печи при температуре 0.85 $t_{пл}$ и азотировали при 1700°С в атмосфере азота до образования твердого раствора Zr_{1-x}U_xN. Цирконий из покрытия образует нитрид ZrN, одновременно являющийся оболочкой. После азотирования пакет сохраняет первоначальную геометрию с развитой поверхностью. Фрагменты керамики представлены на рис. 6.

Для оценки состояния керамических блоков изучено качество сварных швов в местах контакта гофры с лентой. С учетом малого количества Zr_{1-x}U_xN исследование проводили на нитриде титана TiN. Точки контакта элементов керамического блока изображены на рис. 7. Видно, что критической зоной блока является участок диффу-

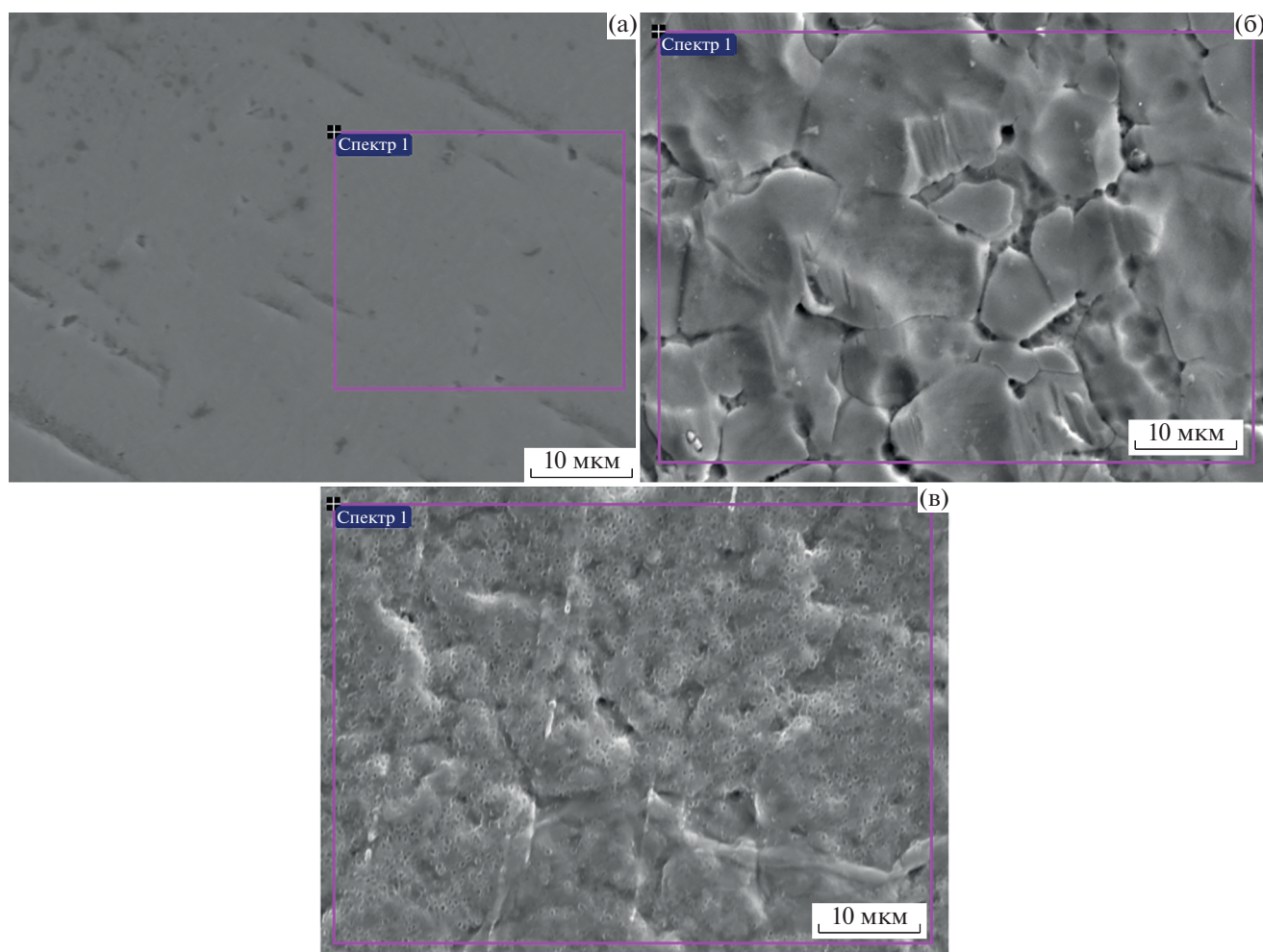


Рис. 5. Морфология поверхности образца Zr–5 мас. % U: а – исходный литой сплав, б – прокатанный сплав, в – после нитридации (отмечены участки спектрального анализа).

зионной сварки. Так, в месте соединения пластин наблюдается только точечный контакт.

На поверхности поперечного среза различают три слоя. Морфологические особенности поверхности связаны с образованием металллокерамического композита: наружный слой – стехиометрический нитрид титана, средний слой – нестехиометрический нитрид и в центре – твердый раствор азота в титане. Образование металллокерамического композита указывает на незавершенность процесса нитридации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для подтверждения концепции замены дисперсного топлива в ТВЭЛах на тонкостенное керамическое топливо были изготовлены модельные керамические пластины и фрагменты блоков. Керамику получали нитридацией твердых растворов урана в цирконии с разным содержанием урана

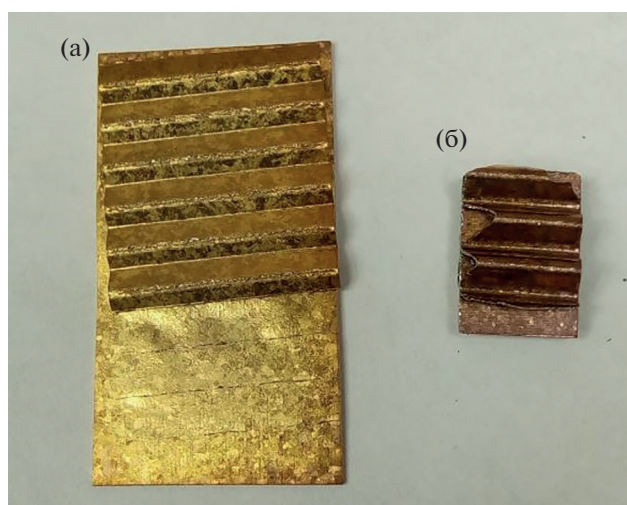


Рис. 6. Внешний вид фрагментов керамических блоков: $Zr_{1-x}U_xN$ (а), TiN (б).

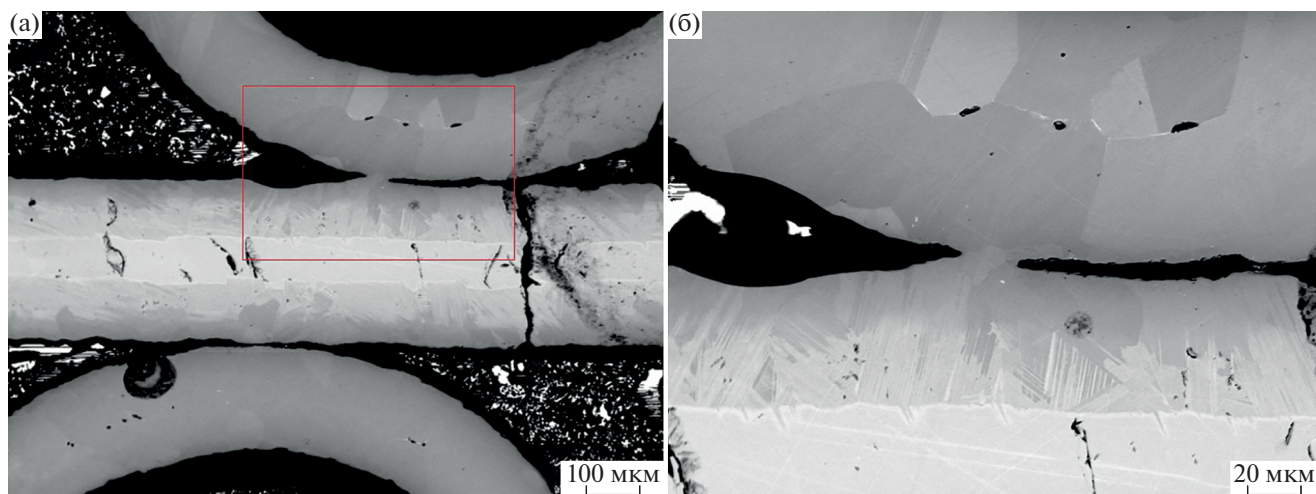


Рис. 7. Морфология поверхности поперечного среза керамического блока TiN в месте контакта гофры и ленты.

(5 и 10 мас. %) до образования $Zr_{1-x}U_xN$. Установлено, что во время плавки слитка и нитридации проката твердого раствора происходит незначительное испарение урана. В ходе высокотемпературного азотирования твердых растворов образуется керамика состава $Zr_{1-x}U_xN$, в которой уран сосредоточен в центральной области образца. Концентрация урана в центральной области происходит во время формирования нитрида циркония.

Исследование морфологии поперечных срезов керамических имитаторов на основе нитридов ZrN и TiN показало, что основные дефекты материала сосредоточены в местах сварки и сгибов гофры. Низкая прочность сварного шва между структурными элементами керамического блока связана с не до конца обработанными режимами диффузионной сварки металла и незавершенностью процесса нитридации. Для устранения дефектов необходим вакуумный отжиг заготовок для снятия напряжений с зоны сварных швов и сгибов.

Нейтронно-физическими расчетами показана возможность достижения критической массы в активной зоне, состоящей из пластин $Zr_{1-x}U_xN$. При этом расчет проводили при содержании урана в композиции 10 и 20 мас. %. Консервативный расчет, не учитывающий наличие отражателя, показывает возможность достижения $K_{eff} = 1.15-1.25$. Возрастание коэффициента связано с увеличением размеров активной зоны вплоть до 2 м. Оценка массы урана в активной зоне дает величину в пределах 400 кг, а масса самой активной зоны, без учета отражателя и стержней СУЗ, может достигать 4000 кг. Оценки показывают, что использование отражателя позволяет снизить размер активной зоны до значений менее 1 м, что соответствует размерам активных зон реакторов БН. Можно отметить некоторую неопределенность в

функциональном назначении реактора, поскольку размеры активной зоны не позволяют использовать его в качестве транспортного реактора. Наличие азота в топливе в целом смещает спектр нейтронов в быструю область. Для более адекватной оценки необходимы дальнейшие расчеты.

Теплофизический расчет показал возможность получения температуры теплоносителя на выходе из активной зоны в пределах $1500^{\circ}C$. Расчеты были проведены для активной зоны размером 50×50 см, объемное энерговыделение которой составляет 3.58×10^6 Вт/м³. Увеличение размеров активной зоны до 1 м снижает объемное энерговыделение и температуру теплоносителя на выходе, однако она остается в пределах $1200^{\circ}C$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нитридацией твердых растворов урана в цирконии синтезированы нитриды твердых растворов $Zr_{1-x}U_xN$. Керамика характеризуется повышенным содержанием урана в центре образца.

Представлена концепция газоохлаждаемого реактора с новым видом топлива на основе $Zr_{1-x}U_xN$, синтезированного высокотемпературным насыщением в атмосфере азота металлических заготовок из твердых растворов урана в цирконии. Подтверждена возможность создания керамических изделий на основе нитридов твердых растворов урана в цирконии сложной формы с развитой поверхностью.

На основании нейтронно-физического расчета активной зоны показана возможность достижения критической массы при содержании урана 10 и 20 мас. %. Определены примерные габариты активной зоны концептуального реактора, которые находятся в пределах 1–2 м.

Проведен теплофизический расчет активной зоны реактора, показана возможность достижения на выходе температуры порядка 1200–1500°C при сохранении допустимого значения объемного энерговыделения.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-13-00392) (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Справочник. М.: Атомиздат, 1967. 484 с.
2. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины. Справочник / Под ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
3. Алексеев С.В., Зайцев В.А. Нитридное топливо для ядерной энергетики М.: Техносфера, 2013. 240 с.
4. Кириллов П.Л. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике. Т. 1. Теплогидравлические процессы в ЯЭУ. М.: ИздАт, 2010. 776 с.
5. Кириллов П.Л. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике. Т. 2. Ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы. М.: ИздАт, 2013. 688 с.
6. Streit M., Ingold F., Pouchon M., Gauckler L.J., Ottaviani J.P. Zirconium Nitride as Inert Matrix for Fast Systems // J. Nucl. Mater. 2003. V. 319. P. 51–58. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(03\)00133-8](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(03)00133-8)
7. Hollmer T. Manufacturing Methods for (U–Zr)N-Fuels: Student Thesis. Stockholm: AlbaNova University Centre, 2011. P. 80.
8. Кузнецов К.Б., Ковалев И.А., Нечаев А.Н., Огарков А.И., Шевцов С.В., Чернявский А.С., Солнцев К.А. Устойчивость структуры компактной керамики нитрида циркония к облучению высокоэнергетическими ионами ксенона // Неорган. материалы. 2016. Т. 52. № 12. С. 1311–1315.
9. Огарков А.И., Шевцов С.В., Кузнецов К.Б., Ковалев И.А., Чернявский А.С., Солнцев К.А. Эффект облучения нитридов титана, циркония и гафния высокоэнергетическими ионами // Неорган. материалы. 2016. Т. 52. № 6. С. 612–616.
10. Кузнецов К.Б., Ковалев И.А., Зуфман В.Ю., Огарков А.И., Шевцов С.В., Ашмарин А.А., Чернявский А.С., Солнцев К.А. Кинетика насыщения циркония азотом в процессе высокотемпературной нитридизации // Неорган. материалы. 2016. Т. 52. № 6. С. 609–611.
11. Shevtsov S.V., Ogarkov A.I., Kovalev I.A., Kuznetsov K.B., Prosvirnin D.V., Ashmarin A.A., Chernyavskii A.S., Solntsev K.A. Structural and Phase Transformations and Hardness of Ceramics Produced by High-Temperature Zirconium Nitriding // Russ. J. Inorg. Chem. 2016. V. 61. № 12. P. 1573–1577. <https://doi.org/10.1134/S0036023616120160>
12. Шевцов С.В., Огарков А.И., Ковалев И.А., Кузнецов К.Б., Ашмарин А.А., Чернявский А.С., Иевлев В.М., Солнцев К.А. Природа структурной неоднородности керамики, образующейся в процессе нитридизации циркония // Неорган. материалы. 2016. Т. 52. № 6. С. 651–655.
13. Шевцов С.В., Кузнецов К.Б., Ковалев И.А., Огарков А.И., Чернявский А.С., Солнцев К.А. Структура и микротвердость керамики, полученной в процессе высокотемпературной нитридизации циркониевой фольги // Неорган. материалы. 2015. Т. 51. № 8. С. 893–900.