

МОДЕРНИЗАЦИЯ УРАН-ЦИРКОНИЕВОГО ТВЭЛА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА ИВГ.1М

Солнцев В.А., Солдаткин Д.М., Нужин В.Н.

АО «НИИ НПО «ЛУЧ»

142103, Московская обл., г. Подольск, ул. Железнодорожная, 24



Представлена разработка твэла дисперсионного типа, в котором уран распределен в циркониевой матрице в виде осеориентированных волокон. Твэл предназначен для перевода исследовательского реактора ИВГ.1М (Республика Казахстан) на низкообогащенное топливо. Решается проблема деформирования непластичного уран-циркониевого сплава путем его замены на гетерогенную композицию. Изготовление твэла основано на процессах обработки материалов давлением. Первоначально путем трехкратного совместного прессования цилиндрической урановой и коаксиальной циркониевой заготовок формируется твэльная проволока с волоконной структурой сердечника. На следующей стадии проволоку путем волочения доводят до требуемого диаметрального размера, далее проводят операции плющения, скрутки и разрезки на мерные длины. Заключительные операции – оплавление торцов твэлов и герметизация гальваническим слоем никеля. При достижении высокой суммарной степени деформации, полученной при холодной обработке, проводятся релаксационные отжиги на уровне температур 550–600°C, которые приводят к образованию трансграничного слоя интерметаллида UZr_2 толщиной 1–2 мкм. Интерметаллидный слой, не оказывая значимого влияния на прочность и теплопроводность композиции, обеспечивает высокое качество диффузионной сварки всех элементов твэла. Комплект из 14040 твэлов лопастного профиля (толщина лопасти 1,5 мм, диаметр описанной окружности – 2,8 мм) был изготовлен и загружен в действующий реактор ИВГ.1М. Энергетический пуск состоялся в 2023 г.

Ключевые слова: уран-циркониевый твэл, композиция, технология, прессование, волочение, разрезка, термообработка, интерметаллид, температурный режим, волоконная структура, реактор.

Для цитирования: Солнцев В.А., Солдаткин Д.М., Нужин В.Н. Модернизация уран-циркониевого твэла исследовательского реактора ИВГ.1М. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 1. – С. 96 – 106. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.1.08>

© Солнцев В.А., Солдаткин Д.М., Нужин В.Н., 2024

ВВЕДЕНИЕ

Потребность в низкообогащенном топливе для исследовательских реакторов возникла в связи с реализацией международной программы по переводу исследовательских и испытательных реакторов на топливо с обогащением менее 20% по изотопу U-235 [1].

В рамках этой программы в 2010 г. в Республике Казахстан стартовал проект по конверсии исследовательского реактора ИВГ.1М – водо-водяного ядерного реактора корпусного типа на тепловых нейтронах, расположенного в Национальном ядерном центре (НЯЦ РК). Принципиальное условие Агентства по атомной энергии РК при модернизации реактора – сохранение теплогидравлических и нейтронно-физических характеристик ТВС и активной зоны реактора при неизменных геометрических параметрах твэлов. Выполненные Аргонской национальной лабораторией США и НЯЦ РК расчетные исследования показали, что замена высокообогащенного (ВОУ) топлива на низкообогащенное (НОУ) не приведет к заметным изменениям эксплуатационных характеристик реактора, при этом массовая доля урана в сердечнике твэла-НОУ увеличится с 3 – 4,3% до 15,5 – 20,6%, т.е. примерно в 5,5 раза. Однако переход ВОУ-НОУ не мог быть произведен автоматическим переносом экструзионной технологии, использовавшейся для топлива с низким содержанием U, на топливо с содержанием U примерно в пять раз большим ввиду того, что требуемый для изготовления твэла-НОУ состав сплава U-Zr находится в зоне наименьшей пластичности (рис. 1) [2], что делает практически невозможным использование экструзии.

Решение проблемы было найдено за счет перехода со сплава U-Zr на гетерогенную композицию. То обстоятельство, что характеристики пластичности U и Zr в чистом виде в четыре – шесть раз выше, чем у сплава требуемого состава, и незначительно отличаются по величине, позволяет проводить их совместное деформирование. Поэтому для твэлов-НОУ было решено выполнить топливный сердечник твэла в виде биметаллической дисперсионной композиции волоконной структуры на основе U и Zr.

Идея конструкции волоконных топливных сердечников твэлов была предложена в 90-х годах прошлого века [3].

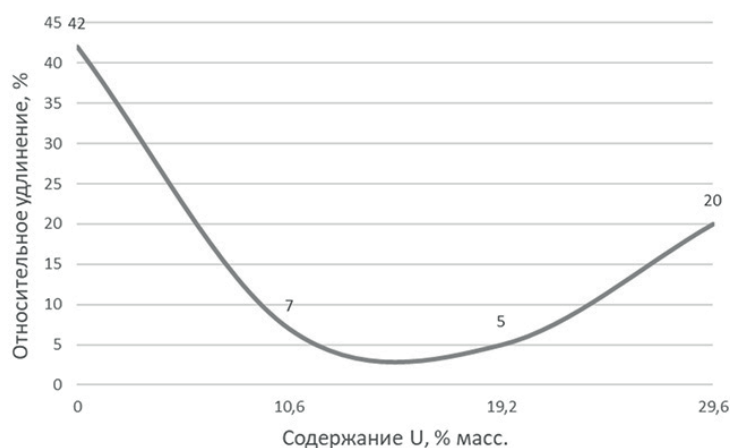


Рис. 1. Относительное удлинение U-Zr-сплавов при 370°C

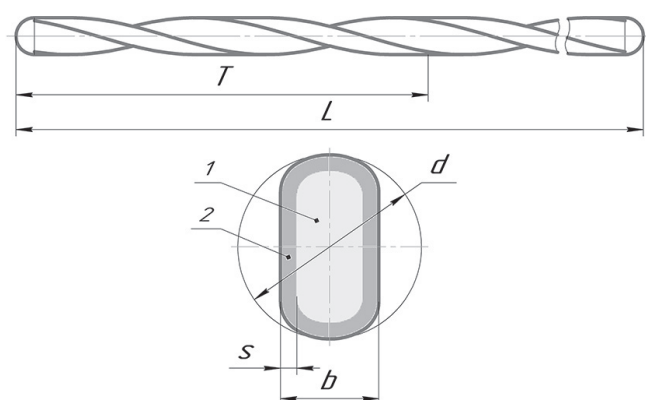


Рис. 2. Конструктивная схема твэла реактора ИВГ.1М: 1 – сердечник – сплав U-Zr; 2 – оболочка – сплав Э110; L – длина; T – шаг закрутки; d – диаметр описанной окружности; b – ширина лопасти; s – толщина оболочки

Твэл представляет собой стержень с поперечным сечением в виде лопасти, закрученный вокруг собственной оси, схема которого показана на рис. 2.

С учетом условия преемственности конструкции ТВС к твэлам-НОУ были установлены технические требования, приведенные в табл. 1.

Далее раскрываются основные аспекты разработки технологии волоконных дисперсионных твэлов-НОУ реактора ИВГ.1М.

Таблица 1

Технические требования к твэлу

Диаметр описанный, мм	2,8 ^{-0,04}
Ширина лопасти, мм	1,5 ± 0,03
Длина, мм	800 ⁻¹ и 600 ⁻¹
Шаг закрутки лопасти, мм	38 ± 8
Содержание U в сердечнике, % масс.	15,5; 18,9; 20,6
Обогащение по U-235, %	19,75 ^{+0,1/-0,3}
Отклонение содержания U-235 от номинального значения, %	+6
Неравномерность распределения U по длине твэла, % от среднего	±12
Загрязненность поверхности изотопом U-235, г/см ²	1·10 ⁻⁸

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВОЛОКОННОГО ТВЭЛА

При изготовлении твэла были использованы наиболее производительные и наименее трудоемкие технологии – прессование, волочение, профильная прокатка биметаллических композиций U и Zr. Принципиальная технологическая схема изготовления волоконного твэла приведена на рис. 3 [4].

Фотография на рис. 4 иллюстрирует основные этапы формирования топливного сердечника и твэла в целом.

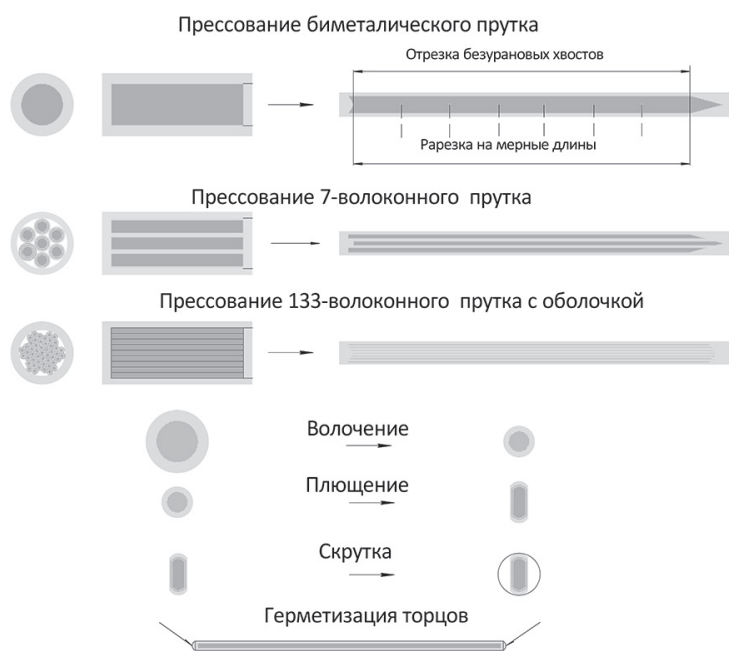


Рис. 3. Технологическая схема изготовления волокнистого ТВЭЛ

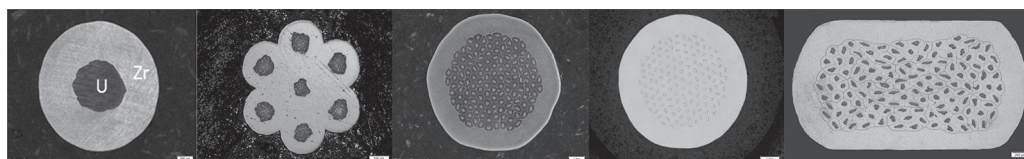


Рис. 4. Микрошлифы поперечного сечения заготовок ТВЭЛ в последовательности технологических переделов

ЭТАПЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Первый этап – прессование биметаллического прутка, геометрия которого определяет массовую долю урана в сердечнике. Сборка состоит из цилиндрического уранового стержня и стакана с торцевой пробкой из циркония (сплава Э110), заключенных в медный стакан с торцевой пробкой. Перед прессованием циркониевый стакан обрабатывался в осветляющем химическом растворе с целью удаления окисной пленки с его поверхности. Оксидный слой с поверхности урана удалялся при помощи шлифовальной шкурки. Все элементы пресс-сборки промывались в спирте. Герметизация циркониевых и медных стаканов осуществлялась посредством электронно-лучевой сварки в вакууме с целью избежать окисления урана и циркония.

Первое выдавливание разогретой заготовки через нагретую матрицу производится на вертикальном гидравлическом прессе. Как правило, соотношение диаметра исходной заготовки к ее высоте не превышает 1:4. Диаметр полученного прутка уменьшается в три – пять раз относительно исходного. Медная оболочка с прутка удаляется в растворе азотной кислоты.

Второй этап – прессование сборки из семи биметаллических прутков. Биметаллический прутки, полученный в результате первого прессования, после удаления мед-

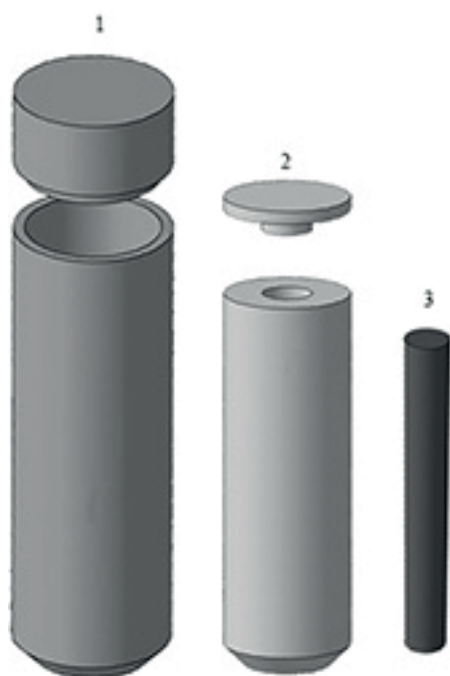


Рис. 5. Элементы пресс-сборки для первого прессования: 1 – медный стакан с крышкой; 2 – циркониевый стакан с крышкой; 3 – урановый стержень

ной оболочки разрезается на заданное количество частей, которые собираются в симметричный пакет из семи штук и заключаются в медную оболочку.

Третий этап – прессование сборки из 19-ти семиволоконных прутков. Пруток, полученный после второго прессования, разрезается на заданное количество относительно коротких стержней, определяется содержание урана в каждом стержне методом гидростатического взвешивания, компонуется пакет с требуемым содержанием урана из 19-ти стержней, которые заключаются в циркониевый стакан, являющийся заготовкой оболочки твэла. На третьем этапе может быть проведена коррекция соотношения урана и циркония в твэле за счет подбора массы урана в пакете стержней или за счет изменения толщины циркониевой втулки. Сборка заключаются в медную втулку, и осуществляется прессование.

Четвертый этап – холодная деформация (волочение, плющение и скрутка). Операция волочения осуществляется за счет пропуска прутка через ряд твердосплавных волок

с последовательно уменьшающимся диаметром рабочего канала.

Цилиндрическая твэльная проволока после волочения сплющивалась в два прохода между валками прокатного стана в кольцевой канавке прямоугольного сечения, выполненной на нижнем валке. Размеры канавки были установлены экспериментально с учетом того, что удлинение проволоки при плющении составляло 8%.

По завершении операций холодной деформации твэлы необходимой длины нарезались из длинномерной «твэльной» проволоки с окончательно сформированным лопастным профилем.

В результате получают твэлы с толщиной лопасти 1,5 мм, диаметром описанной окружности 2,8 мм, длиной 600 и 800 мм. Средний эффективный диаметр уранового волокна составляет 40 мкм, массовое содержание урана в сердечнике – от 15 до 21%.

Торцы твэлов герметизировали слоем никеля толщиной 30 – 100 мкм, для гальванического нанесения которого торцевую область предварительно оплавливали.

Количество циклов прессования определяется требуемым размером уранового волокна и допустимой степенью деформации на каждом этапе. Необходимое количество проходов волочения устанавливали экспериментально с целью получения требуемого диаметра и заданной величины шероховатости поверхности твэльной проволоки.

Внешний вид готовых твэлов представлен на рис. 6.

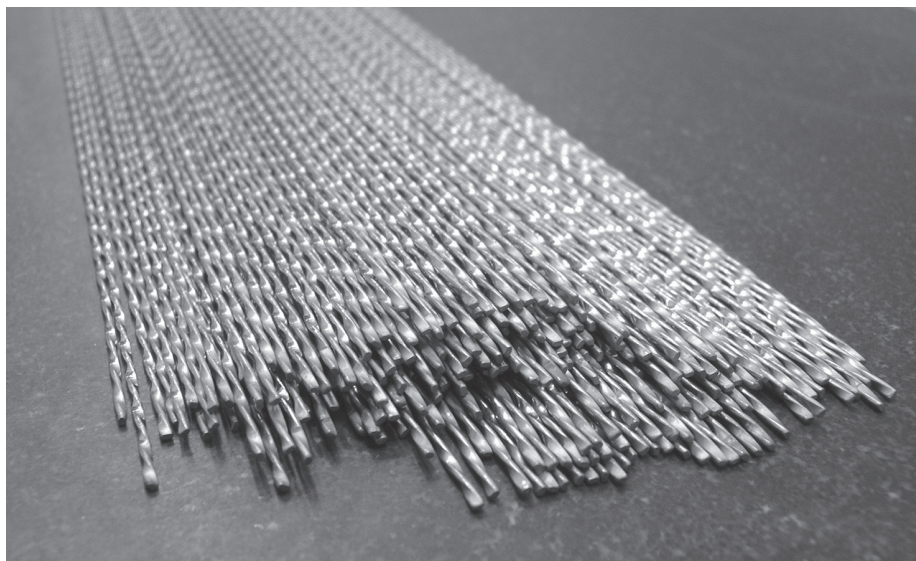


Рис. 6. Внешний вид твэлов-НОУ реактора ИВГ.1М

ВЫБОР РЕЖИМОВ ПРЕССОВАНИЯ

На первых трех этапах прессования происходит диффузионная сварка элементов топливного сердечника. Для получения соединения методом диффузионной сварки необходимо оптимальное сочетание всех параметров процесса, таких как температура, степень деформации за проход и общая степень деформации, направление деформации относительно укладки волокон, количество проходов, соотношение пластичности матрицы и волокна [5]. Прессование биметаллических заготовок – это довольно быстрый процесс, занимающий 20 – 30 секунд, необходимый, главным образом, для прохождения материала через валки, фильеру и т.д., поэтому основными факторами, влияющими на качество диффузионной сварки элементов конструкции твэлов, являются температура и степень деформации. При этом необходимо учитывать возможность образования фаз с низкими эксплуатационными свойствами (хрупкими, высокопрочными, легкоплавкими и т.п.), могущих возникнуть в результате взаимодействия основных материалов твэла между собой и с технологическими примесями.

Анализ совместимости урана и циркония в соответствии диаграммой состояния показал, что при температуре свыше 612°C начинается процесс образования хрупкого интерметаллида UZr_2 , наличие которого при превышении толщины слоя 4 – 5 мкм может приводить при холодной обработке заготовок твэлов к образованию дефектов и их дальнейшим разрывам.

Экспериментально были установлены оптимальные термомеханические режимы прессования – температура на верхней границе существования альфа-фазы урана и степень деформации порядка 94%, при которых толщина интерметаллидного слоя не превышает 2 мкм.

Отдельно оценен эффект локального повышения температуры уранового волокна из-за наличия слоя интерметаллида UZr_2 толщиной 2 мкм. Перегрев урана относительно окружающей матрицы пренебрежимо мал – не более одного градуса (коэффициент теплопроводности интерметаллида принят $7,9 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$) [6].

В связи с высокой химической активностью циркония и урана процессы термической обработки проводились в среде аргона или в вакууме для предотвращения образования оксидных и нитридных пленок, затрудняющих диффузионную сварку.

Процессы прессования, проводимые по указанным выше режимам, обеспечивают высокое качество диффузионной сварки всех элементов топливного сердечника и оболочки твэльного полуфабриката.

ВЫБОР РЕЖИМОВ ВОЛОЧЕНИЯ

Для получения необходимого качества поверхности и требуемого размера твэльной проволоки (конечным диаметром 2,3 мм) наиболее оптимальным является процесс волочения через твердосплавные фильеры. Из имеющегося опыта получения циркониевой проволоки был выбран режим волочения с уменьшением диаметра полуфабриката на 0,2 мм за проход и суммарной степенью деформации не более 50%.

По достижении заданного суммарного коэффициента деформации проводился отжиг при температуре 550 – 600°C в течение одного часа, что обеспечивало снятие напряжений в твэльной проволоке и повышение ее пластичности. Кроме того, столь низкая для циркония температура отжига ограничивает скорость диффузионных процессов на границе раздела уран-цирконий.

Процесс деформирования биметаллических изделий на стадии волочения имеет ряд особенностей, которые находят свое отражение в наличии неоднородностей макро- и микроструктуры твэла. Волоконная структура сердечника формируется в процессе многократного прессования, соответственно прочность сварки заведомо неоднородна по объему пакета.

Из теории волочения известно, что при прохождении материала через деформационную зону волокна существует неравномерное распределение растягивающих напряжений в различных концентрических слоях. Растягивающие напряжения в зоне обжатия в центральных слоях больше, чем в периферийных, что может вызывать нарушение целостности протягиваемого металла в центральных слоях. Кроме того, за счет сдвига урана по границе с цирконием появляется возможность образования внутренних разрывов волокон, что присуще процессу волочения [7]. Этот эффект хорошо виден при сравнении шлифов поперечных сечений одной и той же проволоки на разных этапах передела – после прессования и после волочения (рис. 7). Темные центральные участки биметаллических эле-

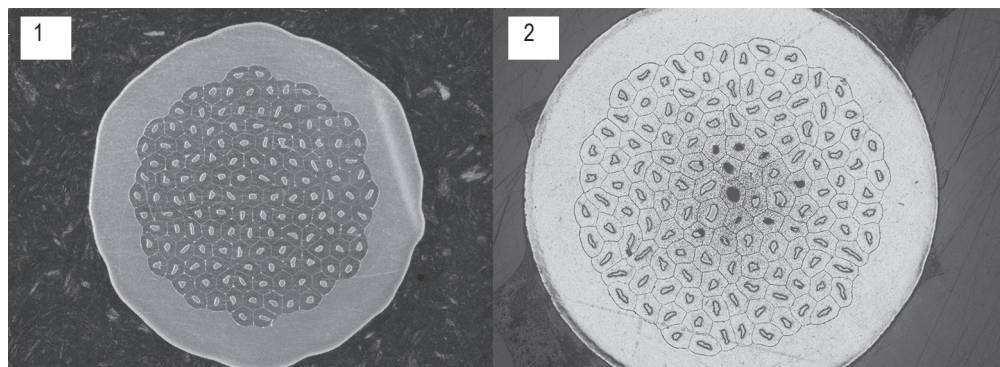


Рис. 7. Поперечное сечение твэльной проволоки: 1 – после прессования; 2 – после волочения

ментов на правом изображении соответствуют местам разрыва урановых волокон. После операции плющения поры от разрывов волокон урана, как правило, закрываются, поскольку наибольшие пластические деформации приходится на центральную часть твэла.

С другой стороны, при относительно низких растягивающих напряжениях в периферийных слоях и при одинаковом состоянии протягиваемого металла во всем объеме деформационной зоны маловероятно образование поверхностных поперечных трещин. Действительно, при контроле целостности оболочек твэлов дефектов типа поперечных трещин не наблюдается.

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ТВЭЛОВ

Для обеспечения качества твэлов-НОУ была разработана и внедрена система контроля их ключевых параметров, приведенная в табл. 2. Система была оснащена необходимой аппаратурой и верифицированными методиками измерений, в том числе специально разработанными для твэлов-НОУ ИВГ.1М [8].

Таблица 2

Система контроля ключевых параметров твэла

Контрольный параметр	Метод определения	Специализированная аппаратура
Содержание U-235 в твэле и равномерность его распределения по длине	γ-спектрометрия излучения урана	Прибор ПНК СУТ-2 для измерения содержания урана и неравномерности его распределения в твэлах реактора ИВГ.1М
Обогащение	Регистрация ионных токов изотопов урана на масс-спектрометре	
Химический состав твэла	Комплекс аналитических методов химического анализа	
Загрязненность поверхности твэла ураном	Регистрация собственного α-излучения изотопов урана	Прибор ПНК РЗА-7М для контроля загрязненности оболочек твэлов
Целостность боковой оболочки	Визуальный осмотр на наличие недопустимых дефектов	
Толщина боковой оболочки	Выборочный контроль на продольных и поперечных шлифах образцов-свидетелей	
Толщина торцевого покрытия	Вихретоковая индукция	Вихретоковый дефектоскоп «Вектор»
Сплошность торцевого покрытия	Регистрация α-излучения на торцах твэла	Прибор дозиметр-радиометр ДКС-96 с детектором БДЗА-96т
Прочность адгезии торцевого покрытия	Контроль на образцах-свидетелях отрывом покрытия от подложки	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для ВОУ-НОУ-конверсии активной зоны реактора ИВГ.1М разработан уран-циркониевый микрогетерогенный твэл волоконной структуры. Изготовление твэлов основано на операциях обработки металлов давлением – прессовании, волочении, плющении. Определены пооперационные деформационные режимы и параметры межоперационной термообработки, подтвержденные материаловедческими исследованиями.

Экспертные расчетные оценки и экспериментальные исследования, в том числе полно-ресурсные реакторные испытания 936-ти твэлов в составе двух экспериментальных ТВС, показали, что волоконные уран-циркониевые твэлы обеспечили выполнение всех условий конверсии реактора ИВГ.1М.

Комплект твэлов для активной зоны в количестве 14040 штук был изготовлен и загружен в действующий реактор. Для физических пусков реактора изготовлено 1428 составных твэлов из фрагментов длиной 100, 200, 300 и 400 мм. Отдельно изготовлена партия из 270-ти твэлов для разрушающего контроля. Энергетический пуск реактора ИВГ.1М-НОУ состоялся 18 мая 2023 г.

Волоконная технология за счет унификации и широкой вариативности по загрузке топливной компоненты, по размерам и форме поперечного сечения, по структуре и материалам матричной композиции при относительно простой перенастройке прокатных технологий может найти применение при разработке твэлов перспективных реакторов различного назначения.

Литература

1. Reduced Enrichment for Research and Test Reactors (RERTR). Электронный ресурс: <https://www.rertr.anl.gov/> (дата доступа 20.11.2023).
2. Емельянов В.С., Евстюхин А.И. Металлургия ядерного горючего. Изд. 2. – М.: Атомиздат, 1968. – 484 с.
3. Дьяков Е.К., Каретников И.А., Нужин В.Н. и др. Твэл с повышенной экологической защищенностью для исследовательских атомных реакторов. // Известия Академии Промышленной Технологии. – 1999. – № 2. С. 19–23.
4. Каретников И.А., Солдаткин Д.М., Солнцев В.А. и др. Дисперсионный тепловыделяющий элемент и способ его изготовления. – Патент ЕАПО, № 027036, МПК G21C 3/02, 21/02, Заявл. 25.12.2015, Оpubл. 30.06.2017.
5. Зарапин Ю.Л., Чиченев Н.А., Чернилевская Н.Г. Производство композиционных материалов обработкой давлением. – М.: Металлургия, 1991. – 351 с.
6. Takahashi Y., Yamawaki M., Yamamoto K. Thermophysical Properties of Uranium-Zirconium Alloys. // J. Nucl. Mater. – 1988. – № 154. – PP. 141–144. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(88\)90127-4](https://doi.org/10.1016/0022-3115(88)90127-4).
7. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. Изд. 2. – М.: Металлургия, 1971. – 448 с.
8. Яковлев Е.И., Жаворонко А.И., Ефремов Ю.П. и др. Градуировка установки и погрешности измерения массы урана в твэлах по собственному гамма-излучению. // ВАНТ. Серия Техническая физика и автоматизация. – 2016. – Вып. 72. – С. 17–32.

Поступила в редакцию 21.12.2023

Авторы

Солнцев Владимир Анатольевич, заместитель начальника лаборатории,

E-mail: solntseva@sialuch.ru

Солдаткин Дмитрий Михайлович, заместитель директора отделения, к.т.н.,

E-mail: soldatkindm@sialuch.ru

Нужин Владимир Николаевич, ведущий научный сотрудник,

E-mail: nuzhinvn@sialuch.ru

UDC 621.039.542.3

Modernization of Uranium-Zirconium Fuel Rod of IVG.1M Research Reactor

Solntsev V.A., Soldatkin D.M., Nuzhin V.N.

Joint-Stock Company «Scientific Research Institute Scientific Production Association «LUCH»

24 Zheleznodorozhnaya Str., 142103 Moscow region, Podolsk, Russia

Abstract

This paper describes the development of dispersion-type uranium-zirconium fuel rod. Uranium is distributed in a zirconium matrix material in the form of axis-oriented fibers. The fuel rod is designed for the conversion of the IVG.1M research reactor (Republic of Kazakhstan) from highly enriched uranium (HEU) to low enriched uranium (LEU). The need for HEU-LEU conversion arose in connection with Kazakhstan joining the program to convert research and test reactors to fuel with reduced enrichment [1]. The work solves the problem of deformation of a low-tech (located in a zone of low plasticity) U-Zr alloys by replacing them with a heterogeneous compound.

The manufacture of fuel rod is based on metal forming processes. Initially, a fuel rod wire with a core of fiber structure is formed by triple co-extrusion of cylindrical uranium and coaxial zirconium billets. At the next stage, the wire is processed to the required diameter by drawing, then the operation of flattening, twisting and cutting into specified lengths is carried out. Upon reaching a high total degree of deformation obtained during cold work, relaxation annealing is carried out at temperatures of 550 – 600°C, which leads to the formation of a transboundary layer of the UZr_2 intermetallic compound with a thickness of 1 – 2 μm . The intermetallic layer, without having a significant effect on the strength and thermal conductivity of the compound, ensures high quality diffusion bonding of all fuel rod components. The final operations are melting of the ends of the fuel rods and sealing by electroplating with nickel. As a result, blade-profile fuel elements are obtained with a thickness of 1.5 mm, a diameter of the circumcircle of 2.8 mm and an average effective diameter of uranium fiber of 40 μm .

A set of 140 fuel rods was manufactured and loaded into an operating IVG.1M reactor. The power start-up took place in 2023. Due to the unification and wide variability in the loading of the fuel component, in size and shape of the cross section, in structure and materials of the matrix compound, the fiber fuel element design can be used in the development of fuel rods for advanced reactors for various purposes.

Key words: uranium-zirconium fuel rod, compound, technology, extrusion, drawing, cutting, heat treatment, intermetallic compound, temperature regime, fiber structure, research reactor.

For citation: Solntsev V.A., Soldatkin D.M., Nuzhin V.N. Modernization of Uranium-Zirconium Fuel Rod of IVG.1M Research Reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024, no. 1, pp. 96 – 106;

DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.1.08> (in Russian).

References

1. «Reduced Enrichment for Research and Test Reactors» (RERTR). Available at: <https://www.rertr.anl.gov/> (accessed Nov. 20,2023).
2. Emelyanov V.S., Evstyukhin A.I. *Metallurgiya yadernogo goryuchego*. Ed. 2. Moscow. Atomizdat Publ., 1968, 484 p. (in Russian).
3. Dyakov E.K., Karetnikov I.A., Nuzhin V.N., Maskaev A.S., Permyakov L.N. Fuel rods with increased environmental protection for research nuclear reactors. *Izvestiya Akademii Promyshlennoy Tekhnologii*. 1999, no. 2, pp. 19-23 (in Russian).
4. Dyakov E.K., Zhalilov R.Kh., Karetnikov I.A., Kolganov A.A., Martynenko A.V., Nuzhin V.N., Soldatkin D.M., Solntsev V.A. *Dispersion fuel rod and the method of its manufacture*. Patent EAPO No. 027036, MPK G21C 3/02, 21/02, Application. Dec. 12, 2015, Published June 30, 2017 (in Russian).
5. Zarapin Yu.L., Chichenev N.A., Chernilevskaya N.G. *Production of composite materials by pressure treatment*. Moscow. Metallurgiya Publ., 1991, 351 p. (in Russian).
6. Takahashi Y., Yamawaki M., Yamamoto K. Thermophysical Properties of Uranium-Zirconium Alloys. *J. Nucl. Mater.*, 1988, No. 154, pp. 141-144; DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(88\)90127-4](https://doi.org/10.1016/0022-3115(88)90127-4).
7. Perlin I.L., Ermanok M.Z. *Drawing theory*. Ed. 2. Moscow. Metallurgiya Publ., 1971. 448 p. (in Russian).
8. Yakovlev E.I., Zhavoronko A.I., Elanchik A.A., Babin A.L., Gorbatenko A.Yu., Cheremukhin A.I., Efremov Yu.P., Soldatkin D.M., Nuzhin D.M. *Arrangement Calibration And Errors Of Uranium Mass Measurements In Fuel Rods Using Natural Gamma Rays*. VANT, Ser. Tekhnicheskaya Fizika i Avtomatizatsiya. 2016, v. 72, pp. 17-32. (in Russian).

Authors

Vladimir A. Solntsev, deputy head of the laboratory,

E-mail: solntsevva@sialuch.ru

Dmitry M. Soldatkin, deputy director of the department, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: soldatkindm@sialuch.ru

Vladimir N. Nuzhin, leading researcher,

E-mail: nuzhinvn@sialuch.ru