

Перспективы разработки атомных станций малой мощности. В настоящее время разработаны твэлы для наземной реакторной установки РИТМ-200Н с активной зоной АС-14-15 [4—6], плавучего энергоблока РИТМ-200М с активной зоной АС-14-19 [7].

Ближайшие перспективы связаны с разработкой твэлов для реакторной установки оптимизированного плавучего энергоблока северного и южного исполнения, реакторной установки Шельф-М наземного и подводного размещения [8, 9], реакторной установки теплоснабжения «Елена».

Заключение. Эксплуатация головной активной зоны в составе реакторной установки № 1 плавучей теплоэлектростанции «Академик Ломоносов» успешно завершилась. Показатели радиационной безопасности находятся в норме. Активная зона снабжена твэлами, разработанными АО «ВНИИНМ». Реакторные испытания, послереакторные исследования, результаты эксплуатации подтвердили их работоспособность и перспективы использования в активных зонах АСММ.

Атомные станции малой мощности являются удачным решением их использования в труднодоступных регионах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев В.М., Большухин М.А., Пахомов А.Н. и др. Опыт создания первой в мире плавучей АЭС. Направ-

ления дальнейшего развития. — Атомная энергия, 2020, т. 129, вып. 1, с. 37—43.

2. Кулаков Г.В., Ватулин А.В., Ершов С.А. и др. Поведение под облучением твэлов плавучих энергоблоков. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2016, вып. 4(87), с. 6—12.
3. Кулаков Г.В., Ватулин А.В., Ершов С.А. и др. Разработка топлива для атомных станций малой мощности и плавучих энергоблоков, состояние и перспективы. — Там же, 2020, вып. 1(102), с. 116—128.
4. Петрунин В.В., Фадеев Ю.П., Пахомов А.Н. и др. Обликовый проект АСММ с реакторной установкой РИТМ-200. — Атомная энергия, 2018, т. 125, вып. 6, с. 323—326.
5. Петрунин В.В., Фадеев Ю.П., Пахомов А.Н. и др. Плавучие энергоблоки с РУ РИТМ-200М. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2019, вып. 1, с. 91—96.
6. Кулаков Г.В., Ватулин А.В., Ершов С.А. и др. Разработка тепловыделяющих элементов для атомных станций малой мощности. — Там же. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2021, вып. 2(108), с. 103—112.
7. Петрунин В.В., Шешина Н.В., Фатеев С.А. и др. Научно-технические аспекты создания инновационной реакторной установки РИТМ-200Н для АСММ. — Атомная энергия, 2023, т. 134, вып. 1—2, с. 3—10.
8. Андреева Л.А., Гольцов Е.Н., Каплиенко А.В. и др. Актуальные задачи развития объектов малой энергетики. АСММ на базе реакторной установки Шельф-М. — Там же, 2020, т. 129, вып. 4, с. 204—210.
9. Кулаков Г.В., Ватулин А.В., Ершов С.А. и др. Обоснование конструкции и материалов компонентов твэлов атомных станций мощностью не выше 10 МВт. — Там же, 2021, вып. 130, т. 6, с. 310—313.

Поступила в Редакцию 19.02.24

УДК 621.039.546:621.039.542.34

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО УРАН-МОЛИБДЕНОВОГО ТОПЛИВА В АЛЮМИНИЕВОЙ МАТРИЦЕ В ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РЕАКТОРАХ

Савченко А.М., Коновалов Ю.В., Кулаков Г.В., Тарасов Б.А., Ершов С.А.,
Майников Е.В., Бубеничиков Д.А. (АО «ВНИИНМ», г. Москва)
e-mail: sav-alex111@mail.ru

Одним из направлений международной программы RERTT — нераспространение ядерных материалов является разработка низкообогащенного топлива для исследовательских реакторов, в частности, построенных в третьих странах по американским и отечественным проектам. Применение низкообогащенного топлива (до 20% ^{235}U) возможно при переходе к более ураноемкому [1—3].

Постепенный переход с интерметаллидного топлива типа UAl_3 — UAl_4 на диоксидное UO_2 , затем на дисилицидное U_3Si_2 позволил достичь 3,5 и 4 г урана соответственно в 1 см³ топливной композиции по сравнению с 2 г, что в некоторых исследовательских реакторах снизило обогащение топлива до 19,75%. Однако для другой части реакторов, в частности, наиболее эффективных высокотемпературных этого оказалось недо-

статочно. Еще одной проблемой является невозможность увеличить выгорание в исследовательских реакторах без повышения обогащения или перехода на еще более ураноемкое топливо.

Поэтому продолжают исследования возможности перехода на уран-молибденовое топливо $U-9Mo$ и $U-10Mo$, имеющее примерно на 50 и 35% соответственно большую ураноемкость по сравнению с UO_2 и U_3Si_2 . Однако вследствие его пластичности из него невозможно изготовить крупку дроблением на стандартном заводском оборудовании и встроиться в технологическую цепочку топлива для исследовательских реакторов, требуется дорогостоящая технология центробежного распыления с большим количеством отходов, так как размер гранул составляет узкий диапазон 60—120 мкм. Большое содержание молибдена 9—10% по массе ухудшает нейтронную физику реактора. Кроме того, уран-молибденовые сплавы взаимодействуют с алюминиевой матрицей при большом выгорании и тепловом потоке. Все это приводит к усложнению технологии, удорожанию продукции и снижению технико-экономических характеристик твэлов, что ограничивает их экспортный потенциал.

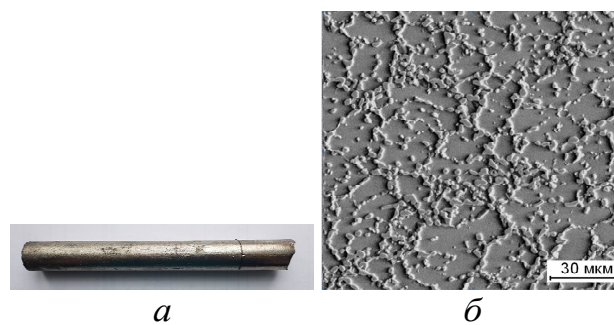
Целью работы является разработка топлива на основе сильнолегированных уран-молибденовых сплавов, позволяющих получить композитную металлокерамическую структуру. Основой структуры сплава является γ -фаза, в которой содержатся также разные керамические (интерметаллидные) фазы. Они должны иметь максимальную плотность по урану, совместимость с алюминием, высокую радиационную стойкость, низкое содержание молибдена и выделяться по границам зерен. Последнее условие позволяет получать частицы топлива дроблением. Керамическая фаза на поверхности частиц после дробления за счет более прочных межатомных связей и наличия в составе кислорода меньше взаимодействует с алюминием по сравнению с γ -фазой. После ее окисления создается дополнительный барьерный слой, препятствующий взаимодействию топлива с алюминиевой матрицей.

Внедрение такого топлива позволит без удорожания технологии изготавливать и поставлять низкообогащенное топливо (твэлы) повышенной ураноемкости и работоспособности в отечественные исследовательские реакторы, в том числе работающие за рубежом, а так-

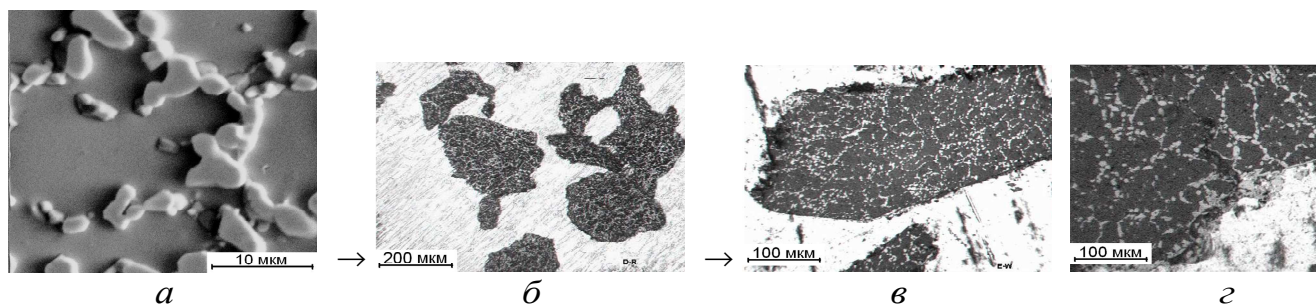
же зарубежные исследовательские реакторы. Конструкция пластинчатого твэла адаптирована в ПАО «Новосибирский завод химконцентратов». При поставке только топлива в виде крупки рынок охватывает исследовательские реакторы в мире.

Экспериментальная часть. В результате термодинамического анализа и расчетов с использованием многокомпонентных диаграмм состояния, подтвержденных затем экспериментально, дополнительно к молибдену выбраны легирующие элементы, которые не входят в твердый раствор урана с молибденом на основе γ -фазы, а образуют отдельные комплексные керамические или интерметаллидные фазы, примерно 30—40% по объему, выделяющиеся по границам зерен и не отбирающие молибден из твердого раствора, сохраняя его стабильность.

На первом этапе исследовалось влияние включения кремния. Кремний слабо уменьшал стабильность γ -фазы урана при снижении содержания молибдена до 5—7% и выделялся по границам зерен в виде интерметаллидных фаз, что важно для получения топлива исследовательских реакторов дроблением [4] (рис. 1). Наличие выделений интерметаллидных фаз по границам γ -фазы позволило получить крупку топлива методом дробления, который применяется в технологической цепочке изготовления топлива исследовательских реакторов. После дробления слабовзаимодействующие с алюминием керамические и интерметаллидные фазы находятся на поверхности частиц, образуя защитный барьер (покрытие), что препятствует взаимодействию с алюминиевой матрицей. На рис. 2 показана структура сплава $U + 6,2\% Mo + 1\% Si + 0,2\% Al$, а также топлива твэла исследовательского реактора в алюминиевой матрице после изготовления и отжига при 600 °C в течение 5 ч [4]. Видно, что слабовзаимо-



Р и с. 1. Слиток (а) и микроструктура сплава $U + 5,7\% Mo + 1,04\% Si$ (б)



Р и с. 2. Структура сплава U + 6,2% Mo + 1% Si + 0,2% Al (а) и топлива твэла исследовательского реактора в алюминиевой матрице после изготовления (б) и отжига при 600 °С в течение 5 ч (в, г)

действующая с алюминием интерметаллидная фаза, находящаяся после дробления на границах топливных частиц, препятствует взаимодействию, которое в результате носит лишь локальный характер.

Несмотря на успешные эксперименты с легированием уран-молибденовых сплавов кремнием, некоторые свойства полученных сплавов не удовлетворяли другим требованиям к топливу, так как молибден все же частично входил в интерметаллидную фазу, уменьшая тем самым его содержание в γ -фазе, что может приводить к уменьшению ее стабильности. Поэтому на втором этапе в уран-молибденовый сплав был введен дополнительно кислород, углерод, азот, кремний. Это повысило температуру ликвидуса и соответственно размерную стабильность топливной композиции. В результате усилились межатомные связи, что позволило снизить распухание топливной композиции. Снижение содержания молибдена в сплаве улучшает нейтронно-физические характеристики топливной композиции.

В зависимости от соотношения легирующих элементов дополнительно могут образовываться комплексные фазы, приведенные в табл. 1. Также возможно дополнительное микролегирование уже стандартными для урана элементами Al, Cr, Sn, Nb, Zr и др. для усиления эффектов (вторичное легирование).

Следует отметить, что образующиеся вторичные фазы слабо снижают ураноемкость сплава, которая определяется твердым раствором на основе γ -фазы. В то же время вследствие высокой температуры плавления и прочной межатомной связи они в значительной степени могут снизить распухание топлива (рис. 3).

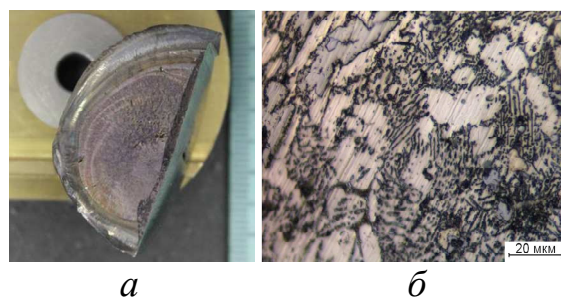
Главная особенность металлокерамических сплавов — наличие в структуре основной

Т а б л и ц а 1. Возможные вторичные фазы и их характеристика в легированном уран-молибденовом сплаве

Фаза	Плотность фазы в составе сплава, г/см ³	Ураноемкость вторичной фазы, г/см ³
Основная γ -фаза	17—18	16—16,9
Вторичные фазы:		
UO ₂	10,96	9,7
UO (при стабилизации O, C или N)	13,63	12,8
UC	13,6	12,9
UN	14,3	13,5
U(C, N, O, Si)	13,7	13
U ₃ Si ₂	12,2	11,3
U ₃ Si	15,6	14,6

γ -фазы, несмотря на почти в 2 раза меньшее содержание молибдена в сплаве.

Состав перспективных сплавов для применения в твэлах исследовательских реакторов приведен в табл. 2. Варьируя состав, можно получать нужные керамические фазы в уран-молибденовом твердом растворе. Можно варьировать и объемное содержание керамических фаз. Следует отметить сохранение содержания урана в сплавах на высоком уровне.



Р и с. 3. Слиток (а) и микроструктура сплава U—Mo—C—O—Si (б)

Т а б л и ц а 2. Состав перспективных сплавов для твэлов исследовательских реакторов

Объем керамических фаз, %	Теоретическая плотность, г/см ³	Теоретическая ураноемкость, г/см ³	Содержание элементов, % по массе (основа уран)					
			Mo	Si	N	C	O	Cr
20	17,6	16,74	4,4	—	—	0,5	—	—
32	17,3	16,3	4,4	—	—	—	1	—
22	16,7	15,7	4,4	—	0,5	0,5	0,5	—
30	15,5	14,6	4,4	1	0,5	0,5	0,5	—
40	16,3	15,14	5	—	—	—	2	—
30	15,7	14,5	4,4	1	0,5	0,5	0,5	0,3

Изготовление металлокерамических сплавов. Было опробовано изготовление сплавов методами индукционной, дуговой плавки, а также порошковой металлургии. Легирующие элементы можно вводить разными способами. Кремний, углерод и хром легко растворяются в уране. Кислород и азот можно вводить в виде диоксида и нитрида урана или в атмосферу плавки. Кислород можно также вводить в виде относительно легкоплавкого оксида молибдена MoO₃, который должен раствориться в уране.

Перспективным следует признать метод порошковой металлургии. Для этого методом ДТА исследовались процессы, проходящие при спекании исходных компонентов, которые взяты в виде порошков. Дополнительный вклад в ускорение спекания вносили сопутствующие взаимодействия компонентов экзотермические процессы.

Методом порошковой металлургии можно получать как полуфабрикат для последующего переplava, так и готовые слитки для дробления крупки топлива. Перспективным способом, возможно, является изготовление полуфабриката методом электроимпульсного прессования исходных порошков с последующим дроблением полуфабриката и изготовлением таблеток в размер также методом электроимпульсного прессования.

Заключение. Таким образом, разрабатываемые для перехода на низкообогащенное топли-

во исследовательских реакторов без усложнения и удорожания изготовления и повышения выгорания твэлов урановые сплавы металлокерамического типа на базе сильнолегированных уран-молибденовых сплавов имеют следующие преимущества:

улучшение совместимости топлива с алюминиевой матрицей по сравнению с уран-молибденовым топливом и, как следствие, повышение его работоспособности;

упрощение изготовления крупки топлива на стандартном заводском оборудовании — не следует изготавливать гранулы методом центробежного распыления;

уменьшение содержания молибдена в сплаве, что улучшает нейтронно-физические характеристики реактора;

снижение распухания топлива за счет содержания в нем радиационно стойких керамических фаз;

повышение выгорания ²³⁵U до 60—80% за счет большей ураноемкости и радиационной стойкости;

возможность применения низкообогащенного топлива в высокопоточных исследовательских реакторах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ватулин А.В., Супрун В.Б., Кулаков Г.В. Разработка топлива для исследовательских реакторов. — Атомная энергия, 2015, т. 119, вып. 5, с. 249—254.
2. Кулаков Г.В., Бубенчиков Д.А., Ватулин А.В. и др. Обобщенные результаты разработки твэлов исследовательских реакторов. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2020, вып. 3(104), с. 71—78.
3. Ye B., Miao Y., Shi J. e.a. Temperature effects on interdiffusion of Al and U—Mo under irradiation. — J. Nucl. Mater., 2021, p. 152684.
4. Savchenko A.M. The issue of novel trends in fuel alloying to reduce interaction. — In: Proc. Research Reactor Fuel Management (RRFM-2018). Germany, 2018, p. AO147.

Поступила в Редакцию 16.04.24