

Уран-молибденовые сплавы в реакторостроении (Обзор)

В. В. Калашников, В. В. Титова, Г. Я. Сергеев, А. Г. Самойлов

Введение

Большинство построенных и запроектированных в различных странах энергетических, транспортных, а также производящих и двухцелевых ядерных реакторов имеет топливные элементы на основе урана [1].

Однако возможность использования чистого урана для изготовления топливных элементов в значительной степени ограничена его свойствами. Резко выраженная анизотропия свойств α -урана, обусловленная его сложной ромбической решеткой, в сочетании со сравнительно низкими прочностными характеристиками при повышенных температурах приводит к значительному изменению форм изделий под действием нейтронного облучения и циклических изменений температуры. При температурах ~ 660 и $\sim 770^\circ\text{C}$ в уране происходят аллотропические превращения, сопровождающиеся объемными изменениями, вследствие чего неоднократные нагревы и охлаждения с переходом через эти точки вызывают серьезные нарушения исходной структуры, формы и размеров блоков горючего (рис. 1). Кроме того, являясь химически активным материалом, уран обладает слабой коррозионной и эрозионной устойчивостью, особенно в воде.

Введение термообработки или некоторых других технологических приемов, позволяющих создавать в уране в условиях реактора более устойчивую мелкозернистую квазиизотропную структуру, не разрешает полностью проблему радиационного повреждения урана и не приводит к резкому повышению эффективности ядерных установок. Более радикальным решением задачи повышения

металлургической устойчивости горючего в ядерных реакторах является использование сплавов урана, которые сохраняют при комнатной температуре изотропную объемно-центрированную кубическую решетку высокотемпературной γ -фазы урана.

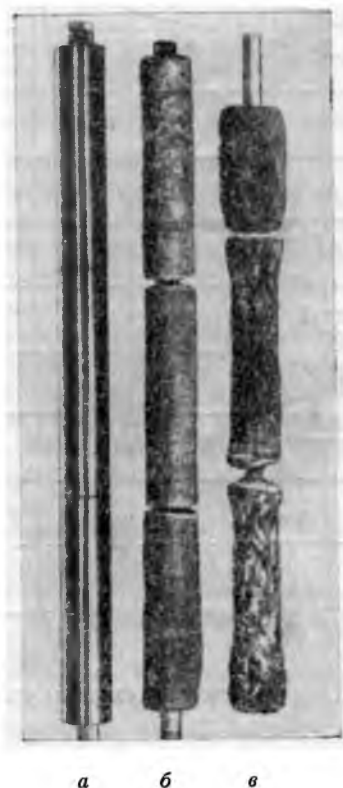


Рис. 1. Внешний вид образцов урана, подвергнутых циклической термической обработке при температуре α - β -превращения [2]:
а—до циклической термической обработки; б—после 100 циклов; в—после 350 циклов.

Наиболее изученными в настоящее время системами такого типа являются двойные сплавы урана с цирконием, молибденом и ниобием.

Настоящая статья посвящена обзору опубликованных данных по свойствам уран-молибденовых сплавов и их использованию в качестве материала горючего топливных элементов гетерогенных ядерных реакторов.

Основные свойства уран-молибденовых сплавов

Свойства сплавов в условиях испытания или эксплуатации прежде всего определяют их составом и строением. В связи с этим

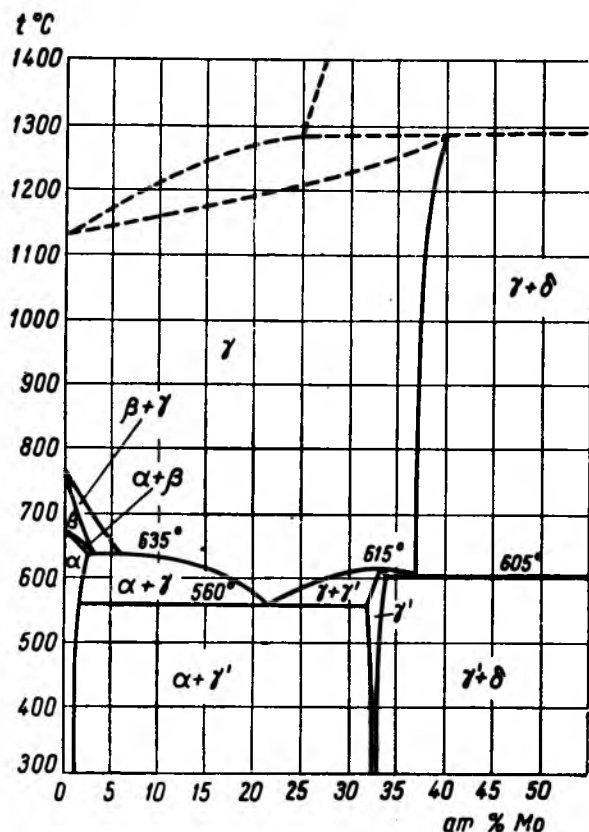


Рис. 2. Диаграмма состояния системы уран—молибден [5].

рассмотрим некоторые данные, вытекающие из диаграммы состояния системы уран—молибден (рис. 2).

При повышенных температурах молибден растворяется в уране в широких преде-

лах, а растворимость его в α -фазе мала. Даже небольшие количества молибдена резко снижают температурную область существования β -фазы. Добавка молибдена ~ 3 вес.% позволяет полностью избежать

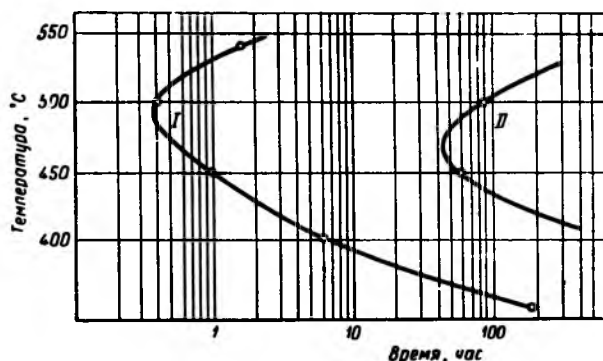


Рис. 3. С-образная диаграмма сплава урана с 9 вес.% молибдена [3].

образования β -фазы. В сплавах, богатых молибденом (более 7%), легко фиксируется метастабильная при комнатной температуре γ -фаза, имеющая объемно-центрированную кубическую решетку и изотропные свойства. При отпуске таких сплавов в температурном интервале 350—550° С происходит превращение γ -фазы в эвтектоидную смесь α -урана и интерметаллида U_2Mo (γ' -фаза) [3]. Однако этот процесс протекает медленно, и для полного превращения требуются длительные выдержки [4]. На рис. 3 приведена в качестве примера С-образная диаграмма сплава урана с 9 вес.% молибдена.

На диаграмме кривая I соответствует началу распада γ -фазы, а кривая II — концу распада. Обратный переход эвтектоида в γ -состояние совершается при нагревании до более высоких температур (выше 600° С).

Характер диаграммы состояния уран — молибден свидетельствует о возможности в широком диапазоне изменять фазовый состав, структуру, а следовательно, физические и механические свойства легированного молибденом урана, изменяя содержание молибдена и режимы термической обработки сплавов. Этот вывод подтверждается приведенными ниже данными.

Приготовление уран-молибденовых сплавов может производиться по следующим технологическим схемам [6]:

1) непосредственным сплавлением урана и молибдена в вакуумных индукционных печах с разливкой в графитовые изложницы;

2) дуплекс-методом — вакуумная индукционная плавка с последующей дуговой переплавкой полученного слитка;

3) в процессе восстановительной плавки урана.

При индукционной плавке применяется графитовая литейная оснастка (тигель, стопор, изложница). При небольших плавках, проводимых в лабораторных условиях, во избежание сильного науглероживания целесообразно графитовую оснастку покрывать окисью циркония или бериллия. В некоторых случаях применяются тигли из окиси циркония или окиси бериллия и медные, охлаждаемые изложницы.

Наиболее равномерное содержание молибдена в сплаве достигается двойной переплавкой. Так, при литье дуплекс-методом содержание молибдена в слитке диаметром 50 мм и длиной 675 мм колебалось для сплава с 12% молибдена в пределах 11,8—12,1 вес. %.

При приготовлении сплава в процессе восстановительной плавки урана без последующей переплавки распределение молибдена также вполне удовлетворительное.

Из-за весьма высоких прочностных характеристик уран-молибденовые сплавы не поддаются многим видам холодной обработки, но они, как правило, хорошо обрабатываются в горячем состоянии при температурах γ -области. Изготовление изделий из сплавов может производиться путем горячего прессования, штамповки,ковки и прокатки. Сплавы с повышенным содержанием молибдена (более 7%) обрабатываются в более узких и жестких температурных интервалах, чем сплавы с пониженным содержанием молибдена. Это объясняется наблюдающейся у них характерной близостью предела текучести к временному сопротивлению.

В работе [6] приводятся следующие данные о применявшихся режимах обработки сплава урана с 12 вес. % молибдена. Температураковки 1065° С (нагрев проводился в ванне с хлористой солью).

Прокатка листов проводилась при 925—1035° С, однако производительность метода была очень низкой из-за быстрого охлаждения заготовки. Прессование выполнялось при

температуре 885—968° С; в качестве смазывающих материалов применялись обычные смазки на основе графита.

В работах [7], [8] описаны методы изготовления образцов сплавов из порошков:

а) холодное прессование смеси порошков урана и молибдена с последующим спеканием при температуре 1100—1150° С;

б) горячее прессование порошков готового сплава.

Плотность холоднопрессованных и спеченных сплавов в зависимости от содержания молибдена приведена в табл. 1.

Таблица 1

Плотность холоднопрессованных и спеченных сплавов в зависимости от содержания молибдена [8]

Содержание Мо, вес. %	Плотность, г/см ³	Примечание
1	18,69	Приведены средние значения плотности
9	17,18	
10	16,84	
12	16,70	

Как видно из изложенного, уран-молибденовые сплавы обладают широкими технологическими возможностями, несмотря на трудности, вызываемые узкими интервалами высоких температур, при которых возможна обработка сплавов.

Механические свойства некоторых уран-молибденовых сплавов. В приведенных ниже табл. 2—6 представлены характеристики механических свойств ряда уран-молибденовых сплавов в зависимости от их состава, технологии изготовления, термической обработки и температуры испытания. Для сравнения приведены некоторые данные для урана.

Как видно из табличных данных, с увеличением содержания молибдена растут прочностные характеристики и снижается пластичность сплавов. При этом выявляется тенденция к сближению значений предела текучести и предела прочности, что особенно наглядно видно на примере сплава с 12% молибдена. При всех температурах испытания (кроме $t=700^\circ\text{C}$, при которой уран находится в состоянии β -фазы) прочность сплавов с содержанием молибдена 2—10 вес. % в 3—5 раз выше прочности урана. Большой

Таблица 2

Влияние содержания молибдена на прочностные свойства сплавов урана при комнатной температуре [2]

Сплав	Предел прочности, кг/мм ²		Предел текучести, кг/мм ²		Удлинение, %		Ударная вязкость, кгм/см ²	
	нижний предел	верхний предел	нижний предел	верхний предел	нижний предел	верхний предел	нижний предел	верхний предел
Уран	41,0	72,0	14,7	27,9	18	—	3,1	6,6
Сплав с 0,5 вес.% Мо . .	69,0	128,5	33,3	64,5	6	43	0,5	2,6
» с 1,0 »	80,0	135,0	37,2	96,0	2	31	0,7	2,3
» с 2,0 »	74,5	133,0	37,2	133,0	0,2	21	0,4	3,1

Таблица 3

Зависимость механических свойств уран-молибденовых сплавов от температуры [2]

Содержание Мо в сплаве, вес.%	Состояние сплава	Предел прочности, кг/мм ² /относительное удлинение, %						
		температура испытания, °C						
		100	200	300	400	600	700	800
Отсутствует	Литой уран	56,0	31,3/24,0	23,7/30,0	10,8/28,0	5,7/42,0	9,0/13,0	—
2,2	Образцы получены	—	—	—	—	—	3,7/66,5	2,8/81,0
4,6	прокаткой с по-	—	59,5/12,0	—	50,5/5,0	19,2/7,0	—	—
6,6	следующей за-	—	66,0/4,0	66,5/6,5	67,5/3,0	—	4,0/70,0	1,7/94,0
7,8	калкой с 900° C	—	59,5/6,0	—	55,0/9,0	38,8/5,0	—	6,4/69,0
10,0	в воду. Выдержка	—	59,0/0,5	—	40,5/1,0	19,8/—	—	6,4/30,0
10,9	при 900° C 7 дней	—	—	—	39,5/0,5	14,5/0,5	16,4/1,0	10,2/6,0

Таблица 4

Механические характеристики сплава с 12 вес.% молибдена при повышенных температурах в зависимости от вида термической обработки [9]

Термообработка сплава	Температура испытания, °C	$\sigma_{0,5}$, кг/мм ²	σ_B , кг/мм ²	δ , %	ϕ , %
Нагрев до 900° C	260	72,0	73,1	6,9	50
Выдержка 24 час	315	75,2	76,0	3,6	23
Закалка в воде	371	68,9	72,0	4,3	23
То же, что и выше, плюс старение при 500° C в течение 3 час	315	72,5	73,1	5,8	45
То же, что и выше, плюс старение при 500° C в течение 37 час	260	80,1	81,5	5,2	37
	315	80,1	83,0	5,3	32

практический интерес представляет резкое возрастание пластичности сплавов с 2—8 вес.% молибдена при температурах γ -области. Высокая пластичность, наряду с низкой твердостью, облегчает условия их горячей обработки.

Из данных, приведенных в табл. 4, следует также, что происходящий в процессе отпуска при 500° C распад γ -фазы с образо-

ванием эвтектоидной смеси $\alpha + \gamma'$ приводит к повышению прочности сплава с 12 вес.% молибдена. Имеющиеся в литературе сведения по свойствам ползучести урана и его сплавов весьма ограничены, что объясняется сложностью проведения длительных испытаний в условиях, исключающих окисление образцов (высокий вакуум или инертная атмосфера). Приведенные в табл. 5 данные

Таблица 5

 Результаты испытаний на ползучесть
уран-молибденовых сплавов [9]

 $(T_{\text{исп}} = 815^\circ \text{C}, \sigma = 0,35 \text{ кг/мм}^2)$

Содержание Мо в сплаве, вес.%	Время испытания, час	Минимальная скорость ползучести, %/час	Удлинение без разру- шения, %
4,8	6,9	2,16	15,1
7,5	160	$3,4 \cdot 10^{-2}$	4,5
7,8	166	$5,2 \cdot 10^{-2}$	7,5
12,3	172	$1,4 \cdot 10^{-2}$	3,6
13,3	191	$2,3 \cdot 10^{-3}$	1,1
13,3	337	$8,0 \cdot 10^{-5}$	0,1

получены при испытании образцов, отлитых в графитовую изложницу в индукционной печи и прокатанных затем при температуре 900—1200° С. Наибольшую сопротивляе-

мость ползучести имеет сплав с 13,3 вес. % молибдена.

Размерная устойчивость уран-молибденовых сплавов при циклических нагревах и охлаждениях. Поведение уран-молибденовых сплавов при циклических нагревах и охлаждениях наиболее полно освещено в работах [8], [10]. Авторами указанных исследований размерная стабильность сплавов изучалась в интервалах температур 100—550° С (табл. 7) и 200—720° С (табл. 8). Циклической термической обработке подвергались образцы диаметром 9,5 мм и длиной 38,1—101,6 мм, помещенные в оболочку из нержавеющей стали (зазоры между образцами и оболочкой заполнялись сплавом натрий — калий). Нагрев производился индукционным методом. Время нагрева 5—7 мин, время охлаждения 20—25 мин.

Таблица 6

Механические свойства при комнатной температуре холоднопрессованных спеченных и быстроохлажденных сплавов урана с молибденом [8]

Содержание Мо, вес. %	Плотность образ- ца, г/см ³	Предел текуче- сти, кг/мм ²	Предел проч- ности, кг/мм ²	Относитель- ное удлинение, %	Твердость по Виккерсу, кг/мм ²
0,8	18,44	48,5	85,8	6,0	279
1,0	18,19	62,6	83,7	4,0	279
1,4	18,41	70,3	96,0	5,5	296
2,0	18,20	61,2	94,9	4,0	306
3,0	18,04	71,0	101,9	1,5	335
3,5	17,96	—	103,3	—	367
4,0	17,94	95,6	116,8	1,0	392

Таблица 7

Результаты циклической термической обработки урана и его сплавов с молибденом в температурном интервале 100—550° С [10], [12]

Содержание Мо, вес. %	Технология изготовления образцов	Удлинение, %			
		50 циклов	100 циклов	300 циклов	700 циклов
Отсутствует	Прокатка при 600° С и отжиг при 575° С	0,9	1,8	5,7	11,6
0,39	То же	1,5—1,67	3,55—3,70	11,1—11,4	20,7—21,5
0,40	» »	1,37—1,40	3,00—3,12	8,4—8,6	15,0—15,2
0,79	» »	0,33—0,57	1,24—1,58	4,9—5,5	10,4—10,8
2,12	Прокатка при 800° С, закалка при 850° С и отжиг при 575° С	0	0,03	0,13—0,22	0,26—0,35
3,91	То же	0	0,03	0	—0,03
6,52	» »	—0,05	—0,03	—0,04	—0,09

Таблица 8

**Результаты циклической термической обработки уран-молибденовых сплавов,
изготовленных различными методами [8]**

(Температурный интервал циклов 200—720° С, количество циклов 500)

Содержание Мо, вес. %	Технология изготовления	Диаметр образцов, мм	Измене- ние длины, %	Измене- ние диа- метра, %	Плотность, г/см ³		Состояние образцов после 500 циклов
					исход- ная	конеч- ная	
Отсут- ствует	Подвергнуты β-об- работке	9,5	9,09— 56,7	13,2— 18,4	18,82— 18,85	17,95— 18,70	Рост во всех направле- ниях, образование шипов, изгиб
1,4	Горячекатаный	9,5	—3,67	+8,48	18,45	—	Образец изогнут, поко- роблен, имеет оваль- ную форму и грубую поверхность
Отсут- ствует	Холоднопрессован- ный и спеченный	9,5	+12,98	+16,76	18,49	13,34	Форма образца грибо- образная
0,5	То же	5,1	+11,3	+1,04	17,57	17,12	Слегка огрубленная по- верхность
1,0	» »	5,1	+0,97	+1,60	17,88	17,42	То же
1,2	» »	9,5	—1,33	+1,72	18,56	18,49	» »
1,4	» »	9,5	+0,8	+1,07	18,52	18,43	Гладкая поверхность
1,75	» »	9,5	+0,66	+0,87	17,97	17,73	» »
2,0	» »	9,5	—0,93	—1,35	18,57	18,36	» »
2,5	» »	9,5	—0,13	+0,88	18,30	18,13	Слегка огрубленная поверхность
3,0	» »	9,5	+2,66	+0,96	18,09	18,03	То же
3,5	» »	9,5	0,26	—0,54	18,12	17,98	Гладкая поверхность
3,75	» »	9,5	—1,07	+0,35	17,62	17,73	» »
4,0	» »	9,5	+0,67	+0,61	16,78	16,77	Легкая жванность по- верхности
4,5	» »	9,5	+0,60	0	17,57	17,48	Гладкая поверхность
6,0	» »	5,1	+0,10	0	16,75	16,71	Без изменений
11,0	» »	5,1	—0,03	0	16,91	16,94	» »

На рис. 4 приведен внешний вид неко-
торых образцов после 700 циклов.

Приведенные в табл. 7 и 8 данные сви-
детельствуют о весьма высокой размерной
устойчивости ряда сплавов урана с молиб-
деном в сравнении с ураном при циклической
термической обработке в α-области и осо-
бенно в высокотемпературной области (200—
720° С). Наиболее резкое повышение раз-
мерной устойчивости наблюдается у сплавов
с содержанием молибдена более 3 вес. %.

**Радиационная устойчивость уран-молиб-
деновых сплавов.** К настоящему времени
опубликован целый ряд статей советских

и иностранных авторов, посвященных изуче-
нию радиационной стабильности уран-мо-
либденовых сплавов. Из них в первую очередь
следует отметить работы С. Т. Конобеевского
[3], [11], [13] и работы [7], [14].

В работе [14] изучалась радиационная
устойчивость сплавов для реактора на быст-
рых нейтронах. Облучение образцов произво-
дилось при температуре 127—244° С в цир-
кониевых контейнерах, наполненных сплавом
натрий — калий. Сплавы для испытания пла-
вились в тиглях из окиси циркония и отли-
вались в холодные медные формы. Слитки
прокатывались при температурах 900—980° С

и из полученных прокаткой заготовок после термообработки вытачивались образцы диаметром 2,54 мм и длиной 19 мм. Образцы подвергались различной термообработке и поступали на испытания как в состоянии

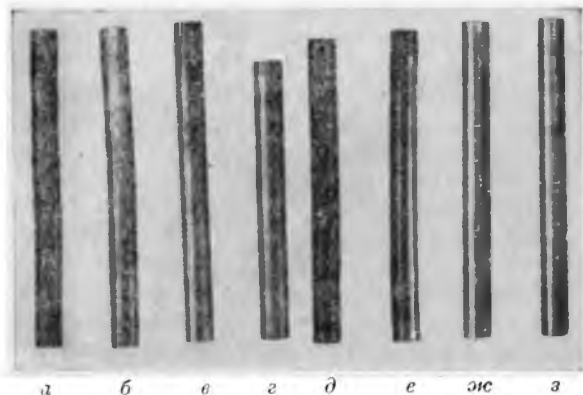


Рис. 4. Внешний вид образцов урана и сплавов урана с молибденом после циклической термической обработки в интервале температур 100—550° С. Образцы предварительно были закалены при 850° С и отожжены при 575° С [10]. Содержание молибдена в %: а—0,00; б—0,05; в—0,10; г—0,20; д—0,46; е—2,12; жс—3,91; з—6,52.

γ-фазы, так и в состоянии частичного или полного ее распада. Выгорание достигало 0,04—0,14%.

Данные, полученные при облучении сплавов с 5, 7 и 10 вес.% молибдена, показали, что сплав с 10 вес.% молибдена обладает наибольшей стабильностью среди всех исследованных сплавов.

На рис. 5 приведен вид образца сплава с 10 вес.% молибдена после радиационных испытаний.

Выбор наиболее эффективной термообработки зависит от содержания молибдена. Так, образцы с 5 вес.% молибдена оказались наиболее устойчивыми в состоянии частичного распада γ-фазы, тогда как максимальная устойчивость 7 и 10%-ных сплавов обнаружена у образцов в состоянии закаленной γ-фазы.

С. Т. Конобеевским с сотрудниками [13] на примере сплава с 9 вес.% молибдена впервые было показано, что под облучением происходит гомогенизация полностью или частично распавшихся сплавов или, другими словами, под влиянием облучения структура сплава приближается к той, которая устойчива при высоких температурах. Это явление впоследствии было подтверждено и

другими авторами, в частности в работе [14].

Теоретическое объяснение наблюдаемого явления дано в работе [11], в которой показано, что переход гетерогенного состояния в гомогенное при облучении можно рассматривать как результат своеобразной диффузии, обусловленной резким повышением температуры в микрообъемах образцов вследствие торможения осколков деления.

В более поздних исследованиях [3] было установлено также, что скорость диффузии,

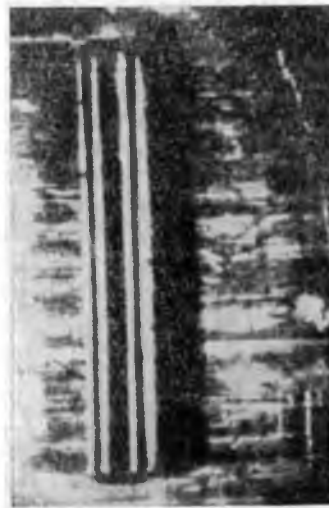


Рис. 5. Облученный образец сплава урана с 10 вес.% молибдена.

Был поставлен на облучение в состоянии закаленной γ-фазы. Не обнаружено изменений в размерах и плотности. Выгорание составило 0,09% общего числа атомов. Температура испытаний 240° С [14].

приводящая к гомогенизации эвтектоида (α+γ')-сплава с 9 вес.% молибдена, обратно пропорциональна квадрату величины зерна (периода пластинчатого эвтектоида).

Явление стабилизации изотропного γ-твердого раствора под облучением имеет большое практическое значение, поскольку оно обуславливает резкое повышение радиационной устойчивости топливных элементов, работающих в температурном интервале распада γ-фазы.

В табл. 9 приведены результаты радиационных испытаний холоднопрессованных и спекенных при температуре 1100° С уран-молибденовых сплавов. Максимальная температура образцов при испытании под облучением была ~90—150° С.

Таблица 9

Результаты радиационных испытаний холодно-прессованных и спеченных уран-молибденовых сплавов [7]

Содержание Мо, вес. %	Выгорание под облучением, % от общего числа атомов	Изменение длины образцов, %	Изменение диаметра образцов, %
1,0	0,17—0,38	2,63—3,41	5,06—6,75
1,4	0,1—0,11	1,5—1,8	0,05—0,5
2,0	0,07—0,10	0,75—1,9	0,14—0,47
2,5	0,055	1,21	0,09

Коррозионная устойчивость уран-молибденовых сплавов в воде. Сведения о коррозии бинарных уран-молибденовых сплавов

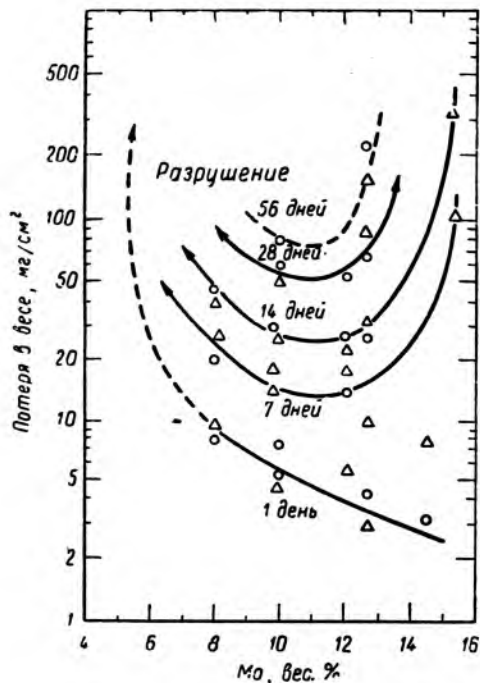


Рис. 6. Влияние содержания молибдена на потерю в весе образцов уран-молибденовых сплавов при коррозионных испытаниях в воде ($T=316^\circ\text{C}$) [16]: $\circ$ — 900°C (7 дней), закалка в воде; Δ — 900°C (7 дней), охлаждение с печью (75°C/час).

в воде при температуре $316\text{—}343^\circ\text{C}$ приводятся в работе [16]. Испытания проводились в автоклаве в дистиллированной воде на образцах, полученных дуговой плавкой и гомо-

генизированных в атмосфере гелия при температуре 900°C в течение 24 час. На рис. 6 приведен график, иллюстрирующий зависимость величины потери в весе образцов спла-

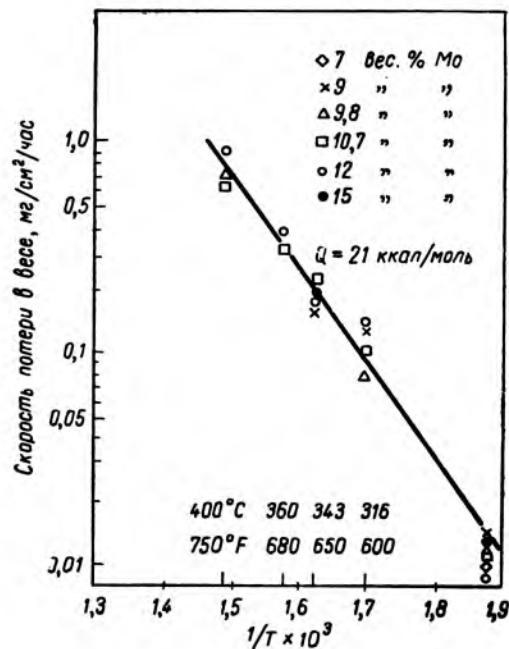


Рис. 7. Скорость коррозии в воде или паре как функция температуры испытания образцов уран-молибденовых сплавов, закаленных из γ -области [16].

вов с различным содержанием молибдена от времени испытания. Результаты испытаний показали, что наилучшей сопротивляемостью коррозии в указанных условиях обладают сплавы, содержащие 10—12 вес. % молибдена.

Зависимость скорости коррозии от температуры испытания представлена на рис. 7. Скорость коррозии увеличивается с увеличением температуры испытания. Так, для сплавов с содержанием молибдена от 9 до 12 вес. %, закаленных из γ -области, скорость коррозии составляет:

при температуре 316°C	0,1 мг/см²·час
» » 360°C	0,3 »
» » 400°C	0,8 »

Коррозионную стойкость сплавов можно повысить, применяя соответствующую термическую обработку или вводя малые добавки других элементов, например платины.

Использование уран-молибденовых сплавов в топливных элементах ядерных реакторов

Несмотря на ограниченность сведений по свойствам уран-молибденовых сплавов, можно сделать некоторые общие заключения о возможности их использования для изготовления топливных элементов гетерогенных ядерных реакторов.

Материал горячего ядерных реакторов должен удовлетворять следующим требованиям:

Устойчивость формы и размеров при работе в реакторе. Это требование является наиболее важным. Изменение формы и размеров горячего при работе приводит к нарушению пространственного расположения топливных элементов, что резко сказывается на тепловом режиме реактора и условиях теплосъема. Эти изменения могут вызвать неравномерное распределение потока теплоносителя и как следствие — местные перегревы и разрушения защитных оболочек.

Обеспечение устойчивости формы и размеров не может быть достигнуто только выбором рациональной конструкции элементов. Первостепенное значение имеют физико-механические свойства горячего и способность его в условиях высоких, периодически меняющихся температур выдерживать длительное воздействие нейтронных потоков и бомбардировку осколками продуктов деления.

Высокая механическая прочность и пластичность. Значительные тепловые потоки вызывают в горячем резкие температурные градиенты, являющиеся источниками внутренних напряжений. Как показывают расчетные формулы, значение максимальных термических напряжений определяется не только геометрией и величиной теплового потока с единицы поверхности горячего q_s , но также такими его характеристиками, как модуль нормальной упругости E , коэффициент Пуассона μ , коэффициент термического расширения α и теплопроводности λ .

Максимальные термические напряжения возникают на граничных поверхностях и могут быть определены из следующих формул [18]:

а) для длинного стержня

$$\sigma_{\tau}^{\max} = \sigma_z^{\max} = \frac{\alpha E q_s d}{8\lambda (1-\mu)},$$

где d — диаметр стержня;

б) для свободной пластины

$$\sigma_1^{\max} = \sigma_2^{\max} = \frac{\alpha E q_s \delta}{6\lambda (1-\mu)},$$

где δ — толщина пластины.

Аналогичные формулы можно вывести и для других случаев.

Термические напряжения могут быть настолько значительными, что при низких механических свойствах горячего вызовут или значительную пластическую деформацию, или в случае малой пластичности материала образование трещин и, следовательно, нарушение нормальной работы элемента.

К числу важнейших механических свойств следует отнести предел прочности, предел текучести, характеристики пластичности — относительное удлинение, сужение площади поперечного сечения и ударную вязкость, а также сопротивляемость ползучести.

Коррозионная и эрозионная устойчивость по отношению к теплоносителю. В условиях длительной работы возможны отдельные аварии, при которых происходит прорыв защитной оболочки топливного элемента. В этом случае, при слабой коррозионной устойчивости, горячее и продукты деления очень быстро могут вымываться теплоносителем, что приведет к накоплению их на поверхности, в зазорах и щелях коммуникаций первичного контура и вызовет значительные трудности при эксплуатации реактора.

Совместимость с конструкционными материалами при рабочих температурах. При выборе материала горячего особое внимание следует обращать на совместимость его с материалом защитной оболочки при рабочих температурах. При этом должна быть исключена возможность диффузионного взаимодействия между ними, так как в противном случае могут возникнуть повреждения, ведущие к разрушению элемента.

Минимально возможный паразитный захват нейтронов. Применяемые в качестве горячего сплавы урана должны обеспечивать минимально возможный паразитный захват нейтронов, что позволяет уменьшить загрузку U^{235} на реактор. С этой точки зрения выгоднее применять легирующие элементы, имеющие меньшую величину макроскопического сечения захвата нейтронов (Σ в $1/\text{см}$).

Высокие технологические свойства. Одним из важных требований, предъявляемых к материалу горячего, является его хорошая

обрабатываемость. Технологические свойства его должны обеспечивать возможность осуществления экономически выгодного процесса массового производства топливных элементов необходимого профиля и размеров.

Анализируя в соответствии с перечисленными требованиями свойства уран-молибденовых сплавов, можно сделать следующие заключения:

1. Легирование урана молибденом позволяет получать сплавы, обладающие в сравнении с чистым ураном значительно более высокими механическими и коррозионными свойствами при повышенных температурах, а также высокой размерной устойчивостью в условиях облучения и циклической термической обработки.

2. Технологические свойства уран-молибденовых сплавов позволяют использовать их для изготовления сердечников топливных элементов различной конфигурации (стержневых, кольцевых и, в меньшей степени, пластинчатых топливных элементов).

3. Использование уран-молибденовых сплавов в реакторах на тепловых нейтронах в связи со сравнительно высоким сечением захвата у молибдена ($\Sigma = 0,16 \text{ см}^{-1}$) приводит к повышению обогащения горючего. Однако, несмотря на это, высокая размерная стабильность в условиях облучения и повышенная коррозионная устойчивость уран-молибденовых сплавов в воде высоких параметров в ряде случаев могут оказаться решающими факторами, обуславливающими их выбор в качестве материала горючего.

Так, например, имеются указания [15] об использовании сплава с содержанием

12 вес. % молибдена для одного из вариантов топливных элементов реактора PWR (Шиппингпорт). В этом случае использование этого сплава, очевидно, продиктовано его высокой радиационной стабильностью и коррозионной устойчивостью в воде.

4. По всей вероятности, целесообразно использовать уран-молибденовые сплавы для реакторов на быстрых нейтронах.

В качестве примера могут служить элементы активной зоны реактора-размножителя на быстрых нейтронах атомной электростанции «Энрико Ферми», работающей на натриевом теплоносителе [17]. Сердечники этих элементов диаметром 3,81 мм изготавливаются из сплава урана с ~17 объемн. % молибдена. Обогащение по U^{235} составляет 25%. Эти сердечники плакированы цирконием толщиной 0,1 мм для создания надежного и безопасного контакта со стальной оболочкой. Максимальная рабочая температура сердечников 705°С, что превышает температуру α — β -превращения чистого урана.

Все это свидетельствует о перспективности использования некоторых уран-молибденовых сплавов как материала горючего для топливных элементов энергетических реакторов. Однако рекомендации по использованию их могут быть даны лишь при детальном рассмотрении конкретных реакторов, их вида, назначения и параметров и только в том случае, если они показывают определенные преимущества перед другими сплавами или композициями на основе урана.

Поступила в редакцию 21 VI 1958 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дж. У. К. Форд. Проекты энергетических реакторов. Госэнергоиздат, М.—Л., 1956.
2. R. W. Nichols. Nucl. Engng 2, 18, 355 (1957).
3. С. Т. Конобеевский, Н. Ф. Правлюк, К. П. Дубровин, Б. М. Левитский, Л. Д. Пантелеев, В. Н. Голянов. Атомная энергия 4, 1, 34 (1958).
4. R. J. Van Thune, McPherson. Trans. of Amer. Soc. Metals 49, 598 (1957).
5. С. Т. Конобеевский, А. С. Займовский, Б. М. Левитский, Ю. Н. Сокурский, Н. Т. Чеботарев, Ю. В. Бобков, П. П. Егоров, Г. Н. Николаев, А. А. Иванов. Доклад № 2230, представленный на вторую Международную конференцию по мирному использованию атомной энергии, Женева, 1958.
6. W. Haynes, E. Foster, a. o. J. Metals, 8, 1076 (1956).
7. J. H. Kittel, S. H. Painc. 2nd Nucl. Eng. and Sci. Conference, paper 57—NESC—65, USA, 1957.
8. A. L. Eiss, Kalish. 3rd Nucl. Eng. and Sci. Conference, USA, paper 178, 1958.
9. Х. А. Селлер, Т. А. Ру. Металлургия ядерной энергетики и действие облучения на материалы. Доклады иностранных ученых на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Гос. научно-техн. изд. литературы по черной и цветной металлургии, 1956, стр. 221.
10. S. T. Ziegler, H. H. Chiswick. Proceedings 2nd Nucl. Eng. and Sci. Conference, Symposium Publications, Pergamon Press, p. 138, 1957.

11. С. Т. Конобеевский. Атомная энергия 1, 2, 63 (1956).
 12. Х. Х. Чизуик, Л. Р. Келман. Металлургия ядерной энергетики и действие облучения на материалы. Доклады иностранных ученых на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Гос. научно-техн. изд. литературы по черной и цветной металлургии, 1956, стр. 612.
 13. С. Т. Конобеевский, Н. Ф. Правдюк, В. И. Кутайцев. Исследования в области геологии, химии и металлургии. Доклады советской делегации на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Изд. АН СССР, 1955, стр. 263.
 14. G. D. Calkins a. o. 2nd Nucl. Eng. and Sci. Conference, paper 57—NESC-13, USA, 1957.
 15. J. Vagi, D. C. Martin. BMJ-942, Aug. 16, 1954.
 16. M. M. Burkart, J. Cohen, R. K. McGarry. Proceedings 2nd Nucl. Eng. and Sci. Conference, Symposium Publications, Pergamon Press, p. 197, 1957.
 17. Nuclear Engineering 2, 12, 112 (1957).
 18. Р. А. Дане. Техника ядерных реакторов (материалы Комиссии по атомной энергии США). Т. II. Изд. ИЛ, 1957, стр. 130.
-