

Влияние низкотемпературного облучения на фазовый состав малолегированных сплавов урана с алюминием и железом

Е. С. КСВ Ю. Е., НАСКИДАШВИЛИ И. А., ПЕТРОСЯН В. В., СОКУРСКИЙ Ю. Н.

УДК 621.039.531

В результате исследований действия реакторного облучения при 60–80° С на фазовый состав малолегированных бинарных сплавов урана с 0,21 ат. % железа; 0,88 ат. % алюминия и 0,68 ат. % кремния на основании обнаруженных изменений электросопротивления было показано [1], что под влиянием облучения в этих сплавах происходят определенные изменения фазового состава. Одновременно установлено, что значительное повышение электросопротивления сплавов, облученных после предварительного отпуска в α -фазе, связано с растворением мелкодисперсных выделений интерметаллидов U_6Fe , UAl_2 и U_3Si и накоплением радиационных дефектов. После облучения сплавов, закаленных из γ -фазы, наблюдалось уменьшение электросопротивления, вызванное частичным распадом пересыщенных твердых растворов.

При облучении малолегированных сплавов урана растворение мелкодисперсных интерметаллических выделений и распад твердых растворов протекают одновременно, так что при продолжительном облучении устанавливается динамическое равновесие фазового состава, при котором количество легирующего элемента, перешедшего в твердый раствор, равно количеству этого элемента, выделившегося из твердого раствора.

Теория радиационной гомогенизации сплавов, содержащих делящиеся вещества, основанная на представлениях о термических пиках [2], не учитывает температуру облучения, поскольку она обычно гораздо ниже той, до которой нагревается материал в объеме пика. Следовательно, скорость радиационной гомогенизации не должна зависеть от температуры облучения. Это положение подтверждают эксперименты по облучению сплава урана с 9 вес. % молибдена при температурах от –90 до +200° С [3].

В то же время скорость распада твердых растворов, определяемая степенью пересыщения материала радиационными дефектами, должна существенно зависеть от температуры облучения, поскольку именно температурой определяется их подвижность. Таким образом, понижение температуры облучения должно затормозить распад пересыщенных твердых растворов, в результате чего уровень электросо-

противления сплава, фазовый состав которого находится в состоянии «динамического равновесия», сместится в сторону значений, соответствующих гомогенному состоянию.

Целью настоящей работы, инициатором которой был С. Т. Конобеевский, явилось исследование изменений фазового состава малолегированных бинарных сплавов урана во время облучения при температуре –150° С. Для оценки этих изменений использован метод электросопротивления.

Исследованные материалы и методика эксперимента

Были исследованы бинарные сплавы урана с 0,21 ат. % железа и 0,88 ат. % алюминия в двух состояниях: закаленные с 850° С и отпущенные после закалки при температуре 350° С в течение 100 ч. Для сравнения исследовали также чистый уран в состоянии после закалки из γ -фазы и отпуска при 500° С в течение 24 ч. Содержание основных примесей в исследованных материалах приведено в таблице.

Примененный для оценки происходящих при облучении изменений фазового состава метод электросопротивления основан на линейной зависимости электросопротивления бинарных малолегированных сплавов урана с алюминием и железом от концентрации этих элементов в твердом растворе. Соответствующие коэффициенты пропорциональности равны 20 $\mu\Omega \cdot \text{см}/\text{ат. \%}$ алюминия и 18 $\mu\Omega \cdot \text{см}/\text{ат. \%}$ железа.

Подробные данные о фазовом составе и микроструктуре исследованных сплавов, полученные методами электронной микроскопии и электросопротивления, опубликованы ранее [1].

Химический состав исследованных материалов

Материал	Содержание примеси $\times 10^3$, вес. %					
	Al	C	Cu	Fe	Ni	Si
Уран	<1	3	1,7	3	<1	<1
Сплав: U + + 0,21 ат. % Fe	10	60	1	50	0,8	5
Сплав: U + + 0,88 ат. % Al	100	60	1,4	6,3	1,2	7

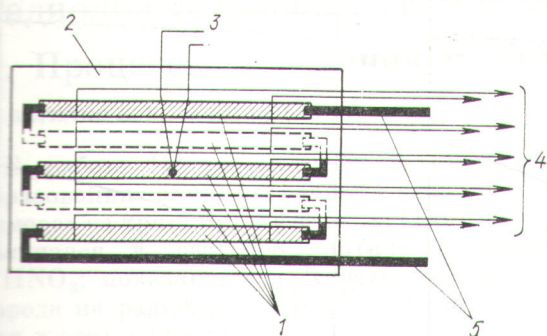


Рис. 1. Схема монтажа образцов на плате, погружаемой в канал реактора:

1 — образцы; 2 — плата; 3 — термопара; 4 — потенциальные провода; 5 — токовые провода.

Закаленные сплавы — это пересыщенные твердые растворы, устойчивые при термических отжигах до температур $\sim 300^\circ\text{C}$. После отпуска в течение 100 ч при 350°C эти растворы распадаются на сплавы с железом (70%) и с алюминием (36%). При этом образуются выделения второй фазы U_6Fe или UAl_2 , средние размеры которых составляют 0,06—0,07 мкм.

Образцы облучены в низкотемпературном канале ядерного реактора Института физики АН ГССР [4]. Интегральный поток тепловых нейтронов составил $5 \cdot 10^{17}$ нейтр/см². Облучению одновременно подвергали пять образцов размерами $45 \times 2,5 \times 0,1$ мм с приваренными к ним токовыми и потенциальными проводами (рис. 1). Электросопротивление образцов измеряли непосредственно в процессе облучения потенциометрическим методом с точностью $\pm 0,01\%$. Температура образцов во время облучения, контролируемая медьконстантановой термопарой, прикрепленной к образцу, расположенному в центре платы, составляла в среднем -152°C . Отклонения температуры от среднего значения не превышали $\pm 3^\circ$ и исключались при определении электросопротивления путем введения поправок, учитывающих температурные коэффициенты электросопротивления исследованных материалов.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Зависимости изменений электросопротивления сплавов и чистого урана от дозы облучения представлены на рис. 2. Электросопротивление чистого урана при облучении увеличивается, что связано с накоплением в его кристаллической решетке дефектов и их комплексов. Видно, что быстрый рост электросопротивления проис-

ходит лишь при малых дозах, не превышающих приблизительно $5 \cdot 10^{16}$ нейтр/см². При больших дозах практически наступает насыщение, причем максимальный прирост составляет приблизительно 0,65 мком·см. Эти данные совпадают с результатами Керэ, который получал чистый уран при -196°C [5].

Значительно больший прирост электросопротивления наблюдается при облучении сплавов. Величина этого прироста и его зависимость от дозы определяются предшествующей термообработкой сплава (рис. 2). У закаленных образцов, в противоположность облучению при 60°C , приводившему к уменьшению электросопротивления [1], облучение при -152°C ведет к его увеличению. Разный знак радиационных изменений электросопротивления указывает, что понижение температуры облучения полностью затормаживает происходящий во время облучения при 60°C распад пересыщенных твердых растворов алюминия и железа в δ -уране, сопровождающийся соответствующим понижением электросопротивления.

Сравнение соответствующих кривых на рис. 2 показывает, что зависимость прироста электросопротивления закаленных сплавов от дозы облучения аналогична зависимости, обнаруженной для чистого урана. Можно полагать, что

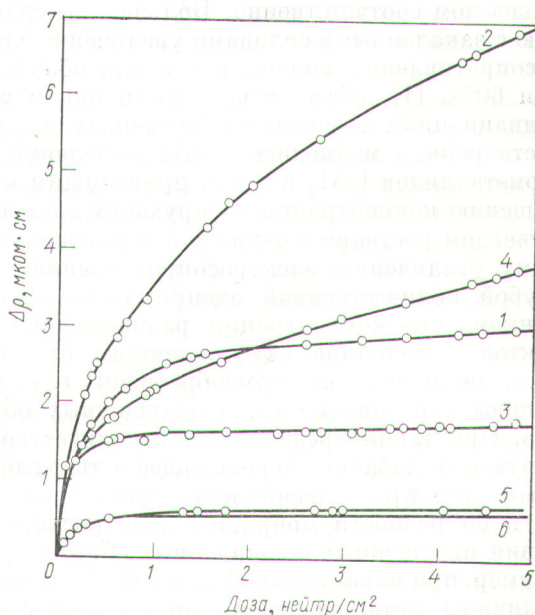
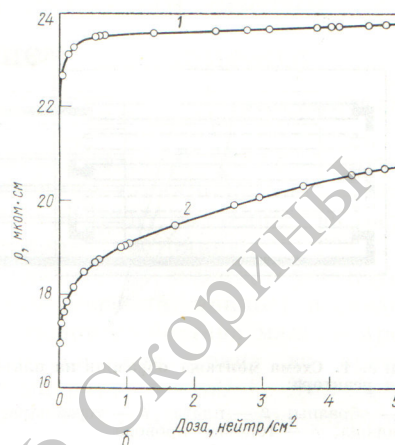
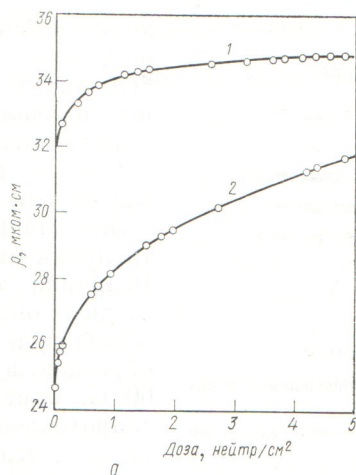


Рис. 2. Изменения электросопротивления урана и его сплавов при облучении:

1, 2 — закаленный и отпущенный образцы сплава урана с 0,88 ат. % алюминия соответственно; 3, 4 — закаленный и отпущенный образцы сплава урана с 0,21 ат. % железа соответственно; 5, 6 — уран; данные настоящей работы и [5] соответственно.

этот прирост, как и для чистого урана, связан с накоплением радиационных дефектов, а его большая величина указывает на повышенную концентрацию этих дефектов, обусловленную их большей устойчивостью из-за присутствия в решетке α -урана растворенных атомов легирующих элементов. Качественно связь между величиной прироста и концентрацией закаленного твердого раствора подтверждает максимальный прирост электросопротивления у закаленного сплава с 0,88 ат. % алюминия, почти вдвое превышающий прирост у сплава с 0,21 ат. % железа, концентрация твердого раствора в котором в четыре раза ниже.

Наиболее сильно при облучении увеличивает электросопротивление отпущенных сплавов. Причем в отличие от случая закаленных сплавов электросопротивление увеличивается во всем интервале доз. В результате при максимальной дозе приросты электросопротивления у отпущенных образцов более чем вдвое превышают приросты у закаленных и составляют 6,95 и 3,8 $\mu\text{ком}\cdot\text{см}$ для сплавов с алюминием и железом соответственно. Бóльшее по сравнению с закаленными сплавами увеличение электросопротивления можно, как и для облучения при 60°C [1], объяснить, помимо накопления радиационных дефектов в отпущенных сплавах, растворением мелкодисперсных выделений интерметаллидов UAl_2 и U_3Fe , приводящим к повышению концентрации легирующих элементов в твердом растворе в α -уране и к соответствующему увеличению электросопротивления. Для грубой количественной оценки этого эффекта примем, что концентрация радиационных дефектов и величина обусловленного ими прироста не зависят от термообработки, т. е. одинаковы для закаленных и отпущенных образцов. При таком предположении количество легирующей добавки, переходящее в твердый раствор за счет растворения выделений, можно оценить по разности приростов электросопротивления отпущенных и закаленных образцов. Например, при максимальной дозе $5 \cdot 10^{17}$ $\text{нейтр}/\text{см}^2$ величины этой разности для сплавов с алю-



Р и с. 3. Зависимость электросопротивления сплавов урана с 0,88 ат. % алюминия (а) и 0,21 ат. % железа (б) от дозы облучения:

1 — закаленные; 2 — отпущенные образцы.

минием и железом составляют 3,9 и 2 $\mu\text{ком}\cdot\text{см}$ соответственно, что означает переход в твердый раствор 0,2 ат. % алюминия и 0,1 ат. % железа. Соответствующие величины, полученные при облучении этих материалов при 60°C [1], составляют 0,15 ат. % алюминия и 0,06 ат. % железа. Таким образом, можно считать, что понижение температуры облучения с 60 до -150°C не уменьшает скорости радиационной гомогенизации.

С увеличением дозы электросопротивление отпущенных сплавов приближается к уровню, соответствующему закаленным. Экстраполяция кривых на рис. 3 показывает, что электросопротивление отпущенных образцов достигнет уровня закаленных при дозах $\sim 1 \cdot 10^{18}$ $\text{нейтр}/\text{см}^2$. На этом основании можно полагать, что при таких дозах отпущенные (гетерогенные) сплавы перейдут в гомогенное состояние.

Поступила в Редакцию 4/III 1974 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конобеевский С. Т. и др. «Атомная энергия», 1967, т. 22, вып. 6, с. 450.
2. Конобеевский С. Т. Действие облучения на материалы. М., Атомиздат, 1967.
3. Bleiberg M. J. Nucl. Mater., 1959, v. 1, p. 182.
4. Вадачгория Л. А. и др. «Атомная энергия», 1969, т. 26, вып. 3, с. 288.
5. Quere Y. J. Nucl. Mater., 1963, v. 9, p. 290.