

# Изменение механических свойств алюминиевого стареющего сплава после эксплуатации в ядерном реакторе

А. П. КУЗНЕЦОВА, Б. В. ШАРОВ

УДК 621.039.56:669.715

Исследовался сплав авиаль марки САВ-1. Это сплав на основе алюминия с содержанием 0,6—1,2% кремния и 0,45—0,9% магния.

Диаграмма состояния системы Al — Mg — Si включает в себя квазибинарную эвтектику между твердым раствором на основе алюминия и интерметаллическим соединением Mg<sub>2</sub>Si. Растворимость Mg<sub>2</sub>Si в алюминии уменьшается от 1,85% при эвтектической температуре до ~0,1% при комнатной температуре [1]. Поэтому после закалки сплава происходит дисперсионное твердение, связанное с появлением в алюминиевой матрице зон, обогащенных легирующими элементами, и образованием на поздних стадиях старения частиц интерметаллида Mg<sub>2</sub>Si.

Сплав САВ-1 используется в качестве конструкционного материала активной зоны ядерных реакторов, так как он не содержит примесей, имеющих большое сечение поглощения тепловых нейтронов\*. Он обладает также удовлетворительной коррозионной стойкостью в воде, углекислом газе и других средах.

В настоящей работе изучались свойства материала авиалевого трубы, проработавшей в качестве технологического канала реактора Института теоретической и экспериментальной физики (рис. 1). Авиалева труба как снаружи, так и внутри омывалась тяжелой водой, температура которой не превышала 80°С. Надводная часть конструкции находилась в среде гелия, температура которого также была ниже 80°С. Температура стенок трубы практически равнялась температуре среды. Труба была поставлена в реактор в закаленном и состаренном состоянии\*\*. Образцы вырубались из стенки авиалевого трубы толщиной 1 мм при помощи штампа. Их рабочая длина была равна 20 мм, а площадь поперечного сечения — 3 мм<sup>2</sup>. Несмотря на то, что вырубка проводилась вдоль и поперек оси трубы, механические свойства образцов были одинаковыми.

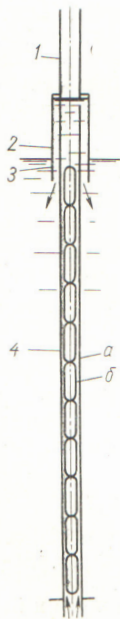


Рис. 1. Схема технологического канала реактора:

а — авиалева трубка; б — урановые тепловыделяющие элементы; 1, 2, 3, 4 — исследованные участки трубы.

**Кратковременные испытания образцов на разрыв.** Значения механических свойств образцов, соответствующие состоянию трубы до эксплуатации в реакторе, даны в табл. 1; там же приведены свойства материала

\* Некоторые данные о влиянии облучения на свойства отожженного сплава САВ-1 и схожего с ним по составу американского сплава 6061 (61S) приведены в работе [2, 3].

\*\* По нашим наблюдениям, механические свойства незакаленного нагартованного авиалья после облучения при температуре ~100°С потоком быстрых нейтронов 10<sup>20</sup> нейтр/см<sup>2</sup> не изменялись.

Механические свойства исследованных образцов

Таблица 1

Участок трубы	$I, \text{нейтр/см}^2 \cdot \text{сек}$	$H, \text{нейтр/см}^2$	$\sigma_B, \text{кг/мм}^2$	$\sigma_{0,2}, \text{кг/мм}^2$	$\delta, \%$	Число образцов
1	~10 <sup>9</sup>	~10 <sup>16</sup>	30,5±0,6	22,8±1,6	11,5±0,8	10
2	—	—	30,2±0,7	23,5±1,4	11,6±0,9	8
3	2·10 <sup>12</sup>	6·10 <sup>19</sup>	30,1±0,4	23,2±0,6	10,4±0,5	5
4	2·10 <sup>13</sup>	6·10 <sup>20</sup>	30,3±0,6	24,8±0,9	10,3±1,1	11
До облучения	—	—	27,5±0,6	21,1±0,9	12,5±0,2	13

после двухлетней эксплуатации трубы в реакторе, а также интенсивность и суммарные потоки быстрых нейтронов. Диаграммы растяжения авиалевого образцов показаны на рис. 2.

Из приведенных данных следует, что во время эксплуатации в реакторе закаленный авиаль заметно упрочился и стал менее пластичным. Изменение механических свойств наблюдалось как у тех частей трубы, которые подвергались интенсивному нейтронному облучению, так и у тех, которые находились вне активной зоны реактора и, следовательно, облучались малым потоком. Аналогичный характер изменений механических свойств наблюдался и после соответствующей выдержки контрольных необлученных образцов в нагретом состоянии вне реактора при такой же температуре.

**Испытания образцов на ползучесть.** Испытания на ползучесть проводились под растягивающей нагрузкой. Измерялась остаточная деформация. После испытания на ползучесть образцы подвергались кратковременному испытанию на разрыв. Результаты испытания приведены в табл. 2.

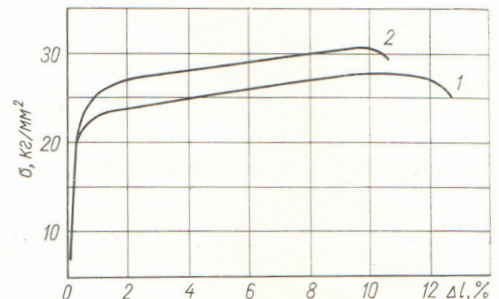


Рис. 2. Диаграммы напряжение — удлинение для образцов авиалья:

1 — до облучения; 2 — после облучения потоком быстрых нейтронов 6·10<sup>20</sup> нейтр/см<sup>2</sup>.

Результаты испытаний контрольных образцов и образцов, облученных потоком  $6 \cdot 10^{20}$  нейтр/см<sup>2</sup>

Таблица 2

Режим испытания на ползучесть			Образец	Остаточная деформация после ползучести, % *	Результаты кратковременного испытания на разрыв после испытания на ползучесть			
T, °C	$\sigma$ , кг/мм <sup>2</sup>	t, ч			$\sigma_B$ , кг/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{0,2}$ , кг/мм <sup>2</sup>	$\sigma$ , %	Число проведенных испытаний
154±4	7	230	Контрольный	2,3±1	19,2±1,6	16,6±2,1	10±1,7	3
			Облученный	1,8±1	19,1±1,8	16,1±1,5	10±1,7	3
154±4	5	350	Контрольный	2,5±1	18,0±1,2	16,0±0,6	7,9±0,1	3
			Облученный	1,4±1	14,7±1,1	12,3±1,3	10,9±0,7	4
100±5	5	2200	Контрольный	<0,5	25,7±1,8	22,7±1,2	8,5±1,4	7
			Облученный	<0,5	24,5±1,8	21,7±1,2	7,8±0,5	7

\* Среднее значение для семи образцов.

Из таблицы видно, что величина остаточной деформации облученных образцов практически не отличается от соответствующей величины для необлученных образцов. Старение образцов во время испытания на ползучесть изменило их механические свойства при кратковременном испытании на разрыв. Облученный материал до испытания на ползучесть был фактически подвергнут искусственному старению при эксплуатации в реакторе.

**Измерение модуля нормальной упругости образцов.** Модуль нормальной упругости, измеренный при комнатной температуре, оказался равным  $7080 \pm 200$  кг/мм<sup>2</sup> как для необлученных образцов авиала, так и для образцов, облученных потоком  $6 \cdot 10^{20}$  нейтр/см<sup>2</sup>.

**Исследование микроструктуры образцов.** При наблюдениях под оптическим микроскопом не было обнаружено никаких изменений в структуре авиала.

Исследования, проведенные при помощи электронного микроскопа, показали присутствие мелкодисперсных выделений (рис. 3), образовавшихся в авиале после двухлетнего облучения. Такие же выделения возникают и во время отжига вне реактора при прочих равных условиях.

Измерения на рентгеновском дифрактометре облученного авиала не выявили присутствия фазы Mg<sub>2</sub>Si.

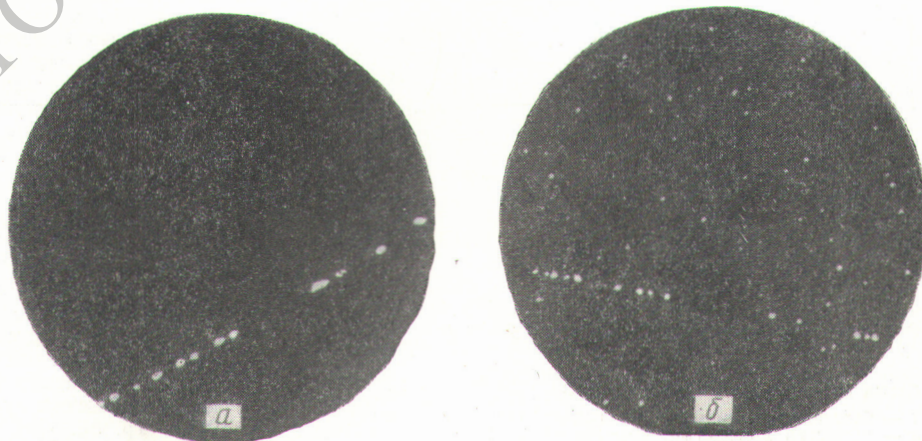
В результате проведенных исследований было установлено, что при эксплуатации трубы из сплава САВ-1 в закаленном и состаренном состоянии в активной зоне ядерного реактора при температуре ниже

80° С и интегральном потоке быстрых нейтронов  $6 \cdot 10^{20}$  нейтр/см<sup>2</sup> происходит упрочнение сплава. При этом запас пластичности остается достаточно высоким, что позволяет использовать этот сплав в качестве конструкционного материала.

Эксперименты показали, что основная причина изменения свойств закаленного авиала — длительное нахождение его в нагретом состоянии (искусственное старение), а не облучение нейтронами. Данные настоящей работы численно согласуются с результатами исследований закаленного и состаренного сплава 6061 (61S), химический состав которого аналогичен сплаву САВ-1 [3].

В заключение авторы выражают благодарность С. А. Гаврилову за помощь в работе.

Поступило в Редакцию 22/1 1966 г.



Р и с. 3. Микроструктура авиала ( $\times 11\ 400$ ):  
а — до облучения; б — после облучения потоком  $6 \cdot 10^{20}$  нейтр/см<sup>2</sup>.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Г. Кузнецов, Е. С. Макаров. «Изв. АН СССР. Сектор физико-химического анализа», 13, 177 (1939).

2. П. А. Петров и др. Действие ядерных излучений на материалы. Сб. докладов. М., Изд-во АН СССР, 1962, стр. 100.  
3. R. Steele, W. Wallace. Metal Progr., 68, 114 (1955).

Ртутная масс-диффузионная колонна для разделения изотопов

Б. И. НИКОЛАЕВ, Ю. П. НЕЩИМЕНКО, Г. А. СУЛАБЕРИДЗЕ,  
В. М. ЛАЛЯН

УДК 541.182.3.543.52

Как известно, эффективность процесса разделения в масс-диффузионных колоннах существенным образом зависит от свойств рабочей жидкости. Выбор в качестве парообразователей преимущественно органических жидкостей во всех предшествующих работах [1—3] был обусловлен стремлением добиться оптимального соотношения между молекулярным весом пара и молекулярными весами компонентов разделяемой газовой смеси, соответствующего наибольшему различию относительных коэффициентов диффузии. Расчет показывает, что если пренебречь паразитными эффектами в колонне и, в частности, растворимостью газовой смеси в пленке конденсата, то степень разделения в колонне при использовании органических жидкостей может быть очень высокой (расчетный коэффициент разделения может достигать нескольких десятков). Кроме того, среди органических жидкостей всегда имеется необходимый набор веществ с подходящей температурой кипения и достаточно низкой упругостью насыщенного пара. Однако имеющая место довольно высокая растворимость разделяемых газов в конденсате приводит к значительному снижению эффекта разделения. Используя до сих пор в качестве парообразователей в масс-диффузионных колоннах такие органические жидкости, как ксилол, нитробензол, тетрахлорэтан и др. [1—3], являющиеся хорошими

растворителями и, кроме того, разлагаются при длительном кипячении. Использование же паров воды вследствие малости ее молекулярного веса весьма ограничено.

В настоящей работе в качестве рабочей жидкости применялась металлическая ртуть, которая имеет достаточно высокий молекулярный вес и подходящую упругость пара. Растворимость газов в ней пренебрежимо мала. Ниже приводятся краткое описание масс-диффузионной колонны и результаты предварительных опытов по разделению изотопов неона в парах ртути в безотборном режиме. Схема колонны представлена на рисунке. Диаметр пароподающей трубки 28 мм, диафрагмы — 38 мм, внутренний диаметр внешнего цилиндра 45 мм. Длина рабочей части колонны 1 м. Пар вводится через отверстия в пароподающей трубке, периодически расположенные по высоте (25 рядов отверстий диаметром 1 мм по 12 отверстий в ряд). Для возбуждения циркуляции в нижней части пароподающей трубки просверлен дополнительный ряд отверстий. Внутри пароподающей трубки расположен дополнительный подогреватель для равномерного прогрева пара по высоте и для предотвращения конденсации ртути на диафрагме и пароподающей трубке. Все детали колонны изготовлены из материалов, не образующих амальгамы. Пористая перегородка представляла собой сетку из нержавеющей стали, которая имела 10 400 отверстий на квадратный сантиметр с размером ячейки  $4 \cdot 10^{-3}$  мм<sup>2</sup> (диаметры проволоки 64 и 32 мк). После специальной обработки сетка свертывалась в два слоя. В результате предварительных экспериментов по разделению изотопов неона на описанной выше колонне с использованием двухслойной диафрагмы был получен при рабочем давлении смеси 20 мм рт. ст. в безотборном режиме максимальный фактор разделения колонны, равный 17. Исследование процесса разделения продолжается.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность И. Г. Гвердцители за постановку задачи, ценные советы и указания, Ю. В. Николаеву за техническую помощь в создании установки, А. А. Сазыкину, Р. Я. Кучерову за обсуждение результатов и полезные советы, а также З. Н. Сабирову за проведение масс-спектрометрического анализа.

Поступило в Редакцию 12/IV 1966 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Г. Гвердцители и др. В кн. «Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1958». Доклады советских ученых. Т. 6. М., Атомиздат, 1959, стр. 69.  
2. W. de Web, J. L. o. s. Z. Naturforsch., 19a, 747 (1964).  
3. M. Benedict, A. Boas. Chem. Engng Progr., 47, 51 (1951).

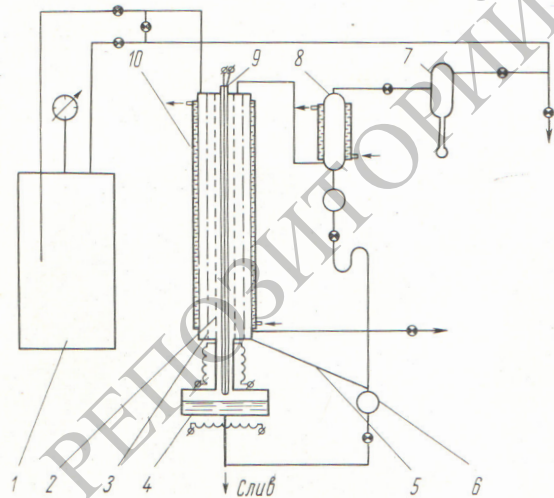


Схема масс-диффузионной колонны:

1 — балластный объем; 2 — пароподающая трубка; 3 — пористая диафрагма; 4 — испаритель; 5 — слив конденсата; 6 — калиброванный объем; 7 — капиллярный расходомер; 8 — внешний конденсатор; 9 — дополнительный подогреватель; 10 — внутренний конденсатор.