

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-3-25-32>

УДК 539.125.52+539.5

ИЗМЕНЕНИЕ ПРОЧНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ САВ-1 АМГ-2, ОБЛУЧЕННЫХ НЕЙТРОНАМИ

Ш. А. Аликулов, С. А. Байтелесов, Ф. Р. Кунгуров*, Д. П. Таджибаев, Д. Д. Тожибоев

Институт ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан

**E-mail для контактов: fkgungurov@inp.uz*

Коллективом авторов проведено исследование состояний и радиационных повреждений сплава алюминия САВ-1 до и после облучения нейтронами дозами 10^{16} – 10^{20} н/см². Измерения проводились объемными методами (малоугловое рассеяние нейтронов и дифракция нейтронов) с целью анализа корреляции структурного состояния с результатами измерений прочности образца, полученными с помощью нагрузочной машины. Выявлены закономерности в зависимости от флюенса быстрых нейтронов прочностных параметров и определены закономерности взаимозависимости прочностных параметров.

Ключевые слова: сплав алюминия САВ-1; нейтронное облучение; нейтронное рассеяние; микроструктура; фазовый состав.

ВВЕДЕНИЕ

В реакторе ВВР-СМ ИЯФ АН РУз из алюминиевого сплава САВ-1 (Al–Mg–Si) изготовлены конструкционные материалы и элементы активной зоны, такие как: трубопроводы, баки, вертикальные экспериментальные каналы, опорная решетка, вспомогательные конструкции в активной зоне реактора, в качестве матрицы сердечника дисперсионных твэлов и оболочек твэлов.

Построенный и запущенный в эксплуатацию в 1959 г. реактор ВВР-СМ работает до настоящего времени благодаря высоким функциональным свойствам используемых материалов, прежде всего сплавов алюминия. Фазовый состав сплавов данного типа (авиали) зависит от соотношения концентраций основных легирующих элементов — магния и кремния, поэтому основными фазами в сплаве САВ-1 являются $\alpha(\text{Al}) + \text{Mg}_2\text{Si} + \text{Si}$. Кроме основных фаз в зависимости от химического состава могут присутствовать интерметаллические соединения (AlSiFe , $\text{Al}_{10}\text{Mn}_2\text{Si}$, AlSiMnFe и др.).

Радиационные условия, в которых могут оказаться конструкционные материалы в реакторе, обычно предсказать трудно, влияние длительного облучения на материалы часто можно определить лишь опытным путем, в процессе работы реактора.

В связи с труднодоступностью измерения прочности и структуры конструкционных материалов является технически трудной задачей, кроме этого, они имеют большую активность в виде бета и гамма-излучений. Некоторые конструкционные материалы исследовательского ядерного реактора ВВР-СМ используются больше 60 лет без замены.

В литературных источниках имеются работы по определению параметров сплава САВ-1 и изменению свойств под действием нейтронного облучения.

В работе [1] получена микроструктура исходного сплава САВ-1 (до облучения). Показано, что в результате естественного старения происходит пере-

группировка атомов примесей внутри пересыщенного твердого раствора, которая приводит к образованию субмикроскопических областей с неоднородным распределением концентраций примесей (зоны Гинье-Престона).

В работе [2] методами малоуглового рассеяния нейтронов исследована надатомная структура на образцах сплава САВ-1 (исходном и облученном флюенсами быстрых нейтронов $3.48 \cdot 10^{22}$ н/см²). В результате в облученном материале обнаружено заметное уменьшение объемной доли рассеивающих структур (пор) радиусом 40–50 нм, которое в значительной мере компенсировалось ростом общей доли таких объектов радиусом менее 20 нм. Результаты нейтронных исследований коррелируют с данными механических испытаний облученных сплавов и изменением их элементного состава.

В работе [3] методом малоуглового рассеяния нейтронов исследованы образцы сплава САВ-1 — исходного и облученного флюенсом быстрых нейтронов $2 \cdot 10^{21}$ н/см². Показано, что наблюдаемые высокие значения сечений рассеяния связаны с наличием в материале нано размерных пор с радиусами $R \sim 5$ –50 нм, тогда как для возможных включений фаз Mg_2Si и Si факторы контраста и предельные объемные доли приводят к оценкам сечений на два порядка меньше наблюдаемых в эксперименте. В результате облучения обнаружено более чем двукратное уменьшение объемной доли рассеивающих объектов (пор) радиусом 40–50 нм, что в значительной мере компенсировалось ростом общей доли частиц с радиусами 5–8 и 20–25 нм при увеличении на 40% суммарной площади поверхности рассеивающих объектов.

В работе [4] исследовано влияние длительного нейтронного облучения и пострадиационного термического старения на микроструктуру и механические свойства реакторного алюминиевого сплава Al–Mg–Si (марки САВ-1). Материалом для исследований служила оболочка стержня тонкого автоматического

регулирования реактивности активной зоны исследовательского реактора ВВР-К. Проведены последовательные часовые отжиги в интервале температур 100–550 °С образцов сплава САВ-1, облученных до 0,001 и 5 сна. Изучены эволюция тонкой структуры и изменения механических характеристик материала. Обнаружен эффект ускорения старения сплава САВ-1 под действием высокого флюенса нейтронов при температуре облучения 80 °С, выражающийся в образовании в материале множественных строчечных зон Гинье-Престона. Показано, что прочностные свойства сплава САВ-1 в значительной степени определяются уровнем радиационно-термического старения.

Обнаружен эффект ускорения старения сплава САВ-1 под действием высокого флюенса нейтронного облучения (5 сна, $1,3 \cdot 10^{22}$ н/см²) при температуре 80 °С, выражающийся в образовании в материале множественных строчечных зон Гинье-Престона. Показано, что прочностные свойства сплава САВ-1 зависят как от дозы облучения, так и, в гораздо большей степени, от температуры нагрева. Показана возможность применения процедуры отжига для восстановления свойств и структуры данного реакторного материала после длительного облучения.

В работе [5] исследована коррозионная стойкость материала тепловыделяющих сборок исследовательского реактора ВВР-К - низколегированного алюминиевого сплава САВ-1. Представлены данные мониторинга о состоянии поверхности оболочки стержня автоматического регулирования и стержня-вытеснителя после полного срока эксплуатации в активной зоне реактора и длительного вылеживания во временном водном бассейне. Установлены закономерности развития коррозии в материале, облученном различным флюенсом нейтронов.

Выявлено, что коррозионная стойкость алюминиевого сплава САВ-1 определяется его структурным состоянием, которое при различных дозах воздействия нейтронного облучения определяет термодинамическую неустойчивость сплава и кинетику возникновения и развития дефектов.

В работе [6] приводятся данные по влиянию нейтронного облучения на склонность к коррозионному растрескиванию (КР) и межкристаллитной коррозии (МКК) низколегированного алюминиевого сплава САВ-1, являющегося основным конструкционным материалом исследовательского реактора ВВР-К. Установлено, что доза облучения играет основную роль в изменении коррозионных свойств низколегированного алюминиевого сплава. Найдено, что склонность к МКК максимальна у материала, облученного флюенсом нейтронов 10^{17} н/см², что обусловлено растворением частиц второй фазы и повторным возникновением зон Гинье-Престона под влиянием облучения. При этом материал переходит в структурное состояние, аналогичное термической обработке «возврат при старении». Повышение флюенса облучения

до 10^{22} н/см² ускоряет процесс старения, наблюдается рост и коагуляция включений упрочняющей фазы силицида магния, что повышает склонность сплава к питтинговой коррозии, которая усиливает возможность проявления коррозионного растрескивания.

Исследованиями установлено, что нейтронное облучение изменяет коррозионные свойства материала, при этом доза облучения играет основную роль в повышении скорости коррозии низколегированного алюминиевого сплава САВ-1. Получены данные об изменении химического состава материала в зоне локальных дефектов. Повышение дозы облучения увеличивает количество внесенных дефектов, вызывает образование ячеистой дислокационной структуры, приводит к коагуляции включений второй фазы, что снижает сопротивление питтинговой коррозии. По сравнению с необлученным материалом склонность к МКК также повышенная, однако она ниже, чем у слабо облученного материала.

Установлено, что в условиях ползучести при одновременном действии агрессивной среды и постоянной нагрузки сопротивление коррозии сильно облученного сплава после отжига при 75 и 150 °С минимально и почти в 3,5 раза меньше, чем у необлученных образцов. Увеличение гетерогенности структуры материала определяет повышение склонности к коррозии и коррозионному растрескиванию облученного и отожженного сплава САВ-1.

Несмотря на существенные достижения в исследовании конструкционных материалов реакторов, не проведен систематический анализ изменения прочностных свойств при различных флюенсах нейтронов, до сих пор механизмы этих процессов не были полностью выявлены, поэтому исследования закономерностей протекания радиационных процессов в конструкционных материалах являются одной из актуальных проблем радиационного материаловедения.

Целью исследования является установление механизма воздействия нейтронного облучения на структуры и прочностные свойства конструкционных материалов сплавов САВ-1 и АМГ-2.

Коллективом авторов проведен ряд исследований состояний и радиационных повреждений сплава алюминия до и после облучения нейтронами дозами 10^{16} – 10^{20} н/см² с помощью комплекса результатов, объемными методами (малоугловое рассеяние нейтронов и дифракция нейтронов) с целью исследования механизма воздействия нейтронного облучения на структуры и прочностные свойства конструкционных материалов сплавов САВ-1 и АМГ-2.

1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ И ПРОЧНОСТИ ОБРАЗЦОВ

Для определения микротвердости использовали стандартный прибор ПМТ-3, в котором испытание на твердость производится вдавливанием алмазной пирамиды под нагрузкой от 2(5) до 200 г [7].

Алмазная пирамида имеет квадратное основание и угол при вершине между противоположными гранями 136° . При испытании измеряли длину диагонали отпечатка; твердость H_μ определяется отношением нагрузки к площади поверхности отпечатка:

$$H_\mu = \frac{P}{F} = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,854 \cdot \frac{P}{d^2}, \quad (1)$$

где P – нагрузка на пирамиду (Н), H_μ – микротвердость (ГПа), d – диаметр отпечатка индикатора (мм).

Измерения микротвердости облученных образцов проводились после спада наведенной радиоактивности до допустимой дозы.

Исследования прочностных параметров проводились на образцах алюминиевого сплава САВ-1 и АМГ-2 промышленной поставки, имеющих цилиндрическую форму с разными диаметрами и длинами. Измерения проводились с использованием нейтронного дифрактометра – Фурье-стресс-дифрактометра.

Для исследования внутренних напряжений на канале № 11А реактора ИБР-2 в ЛНФ ОИЯИ (г. Дубна) создан специализированный Фурье-дифрактометр ФСД [8].

Данный прибор создавался с учетом накопленного мирового опыта в постановке исследований внутренних механических напряжений в объемных образцах и изделиях. Использовался опыт ПИЯФ, Гатчина (дифрактометр мини-СФИНС [9]), GKSS, Геестхахт (дифрактометр FSS [10]) и ЛНФ ОИЯИ, Дубна (дифрактометр ФДВР [11]) в применении корреляционной Фурье-техники в дифракции нейтронов.

На этом Фурье-дифрактометре ФСД проведены эксперименты по изучению для серии образцов из алюминиевого сплава САВ-1. Специальная корреляционная методика – использование быстрого Фурье-прерывателя для модуляции интенсивности первичного нейтронного пучка и RTOF-метода для накопления данных – позволяет получать на ФСД дифракционные спектры с высоким разрешением ($\Delta d/d \approx 2 \cdot 10^{-3}$ при угле рассеяния $2\theta = 140^\circ$ и $\Delta d/d \approx 4 \cdot 10^{-3}$ при $2\theta = \pm 90^\circ$) в широком диапазоне межплоскостных расстояний, что обеспечивает необходимую точность регистрации небольших смещений дифракционных пиков и их уширения.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ МИКРОТВЕРДОСТИ САВ-1 И АМГ-2 ДО И ПОСЛЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Результаты измерений микротвердости для образцов сплава САВ-1 представлены на рисунке 1. Из рисунка видно, что зависимость $H_\mu(P)$ можно условно разделить на два интервала: при нагрузках от 0 до 50 г наблюдается резкая зависимость H_μ от нагрузки; с увеличением нагрузки кривые $H_\mu(P)$ становятся более пологими и выходят на насыщение.

Вследствие наличия трещин и пониженной прочности поверхностного слоя, а также из-за возможности поверхностного наклепа, изменение применяе-

мой нагрузки приводит к проникновению алмазной пирамиды в различные по своим физическим и химическим свойствам слои. Полученные в эксперименте значения H_μ отражают особенности свойств этих слоев. На рисунке 1 можно отметить, что величина микротвердости особенно сильно возрастает с увеличением P для образцов, облученных флюенсами нейтронов 10^{16} , 10^{17} и 10^{20} см $^{-2}$.

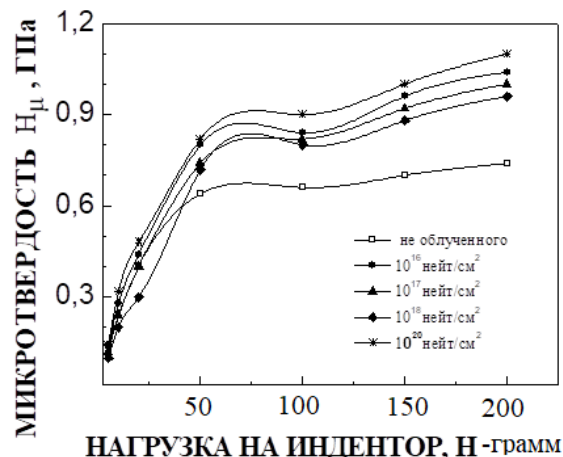
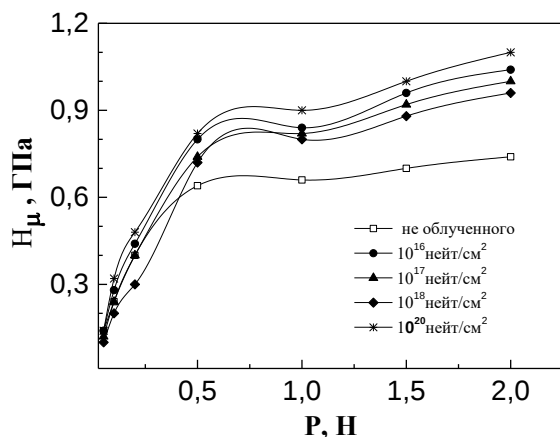


Рисунок 1. Зависимость микротвердости образцов сплава САВ-1 от нагрузки: (1) 10^{16} см $^{-2}$, (2) 10^{17} см $^{-2}$, (3) 10^{18} см $^{-2}$, (4) 10^{20} см $^{-2}$

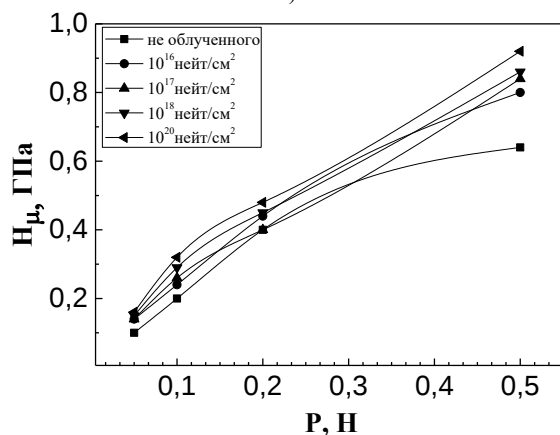
Результаты измерения микротвердости для образцов сплава САВ-1 представлены на рисунке 2. Из рисунков видно, что зависимость $H_\mu(P)$ можно условно разделить на два интервала: при нагрузках от 0 до 50 г наблюдается резкая зависимость H_μ от нагрузки; с увеличением нагрузки кривые $H_\mu(P)$ становятся более пологими и выходят на насыщение. Следует отметить, что при $P = 0,05$ Н микротвердость практически не меняется с дозой; следовательно, имеющаяся дефектность структуры почти не увеличивается при появлении радиационных дефектов. Зависимость $H_\mu(F)$ усиливается при увеличении нагрузки.

Начиная с дозы 10^{16} н/см 2 до 10^{18} н/см 2 можно увидеть уменьшение микротвердости за счет аннигиляции дефектов (как в процессе отжига). При дозе более 10^{18} н/см 2 можно увидеть увеличение микротвердости H_μ за счет дозированного введения дефектов в их кристаллическую и реальную структуры. Также Al–Mg–Si благодаря выделению частиц Mg $_2$ Si и кремния в Al-матрице, повышение содержание кремния, который нарабатывается в процессе облучения в реакторе по реакции Al(n, γ)Si, присутствие Si вызывает увеличение прочности сплавов.

На рисунке 3 приведены зависимости H_μ образцов сплава САВ-1 от флюенса нейтронов при фиксированной нагрузке. Видно, что для сплава САВ-1 до $F = 10^{18}$ см $^{-2}$ наблюдается снижение микротвердости, пропорциональное логарифму флюенса, затем, с дальнейшим набором флюенса, H_μ увеличивается и становится равным величине микротвердости при $F = 10^{16}$ см $^{-2}$.



а)



б)

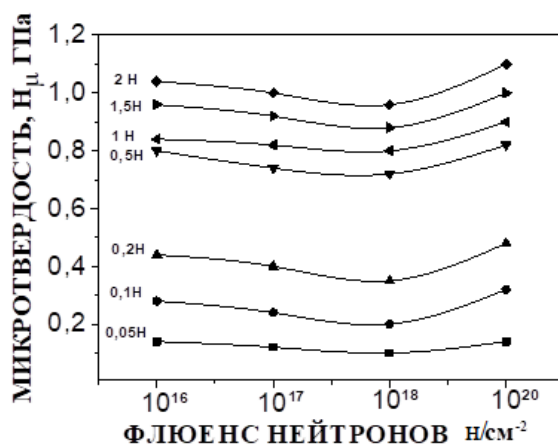
 Рисунок 2. Зависимость микротвердости образцов сплава САВ-1 от нагрузки: (1) 10^{16} нейт/см², (2) 10^{17} нейт/см², (3) 10^{18} нейт/см², (4) 10^{20} нейт/см²


Рисунок 3. Зависимость микротвердости облученных образцов сплава САВ-1 от флюенса нейтронов

Значения микротвердости облученных различными флюенсами образцов сплавов САВ-1 и АМГ-2 в зависимости от нагрузки представлены на рисунках 4 и 5.

Как и для сплава САВ-1, H_{μ} увеличивается с возрастанием нагрузки, переходя к очень слабому насыщению при $P > 100$ г. Следует отметить, что до

$P = 0,5$ Н микротвердость увеличивается приблизительно пропорционально нагрузке, т.е. зависимости $H_{\mu}(P)$ описываются почти линейной функцией.

В отличие от образцов сплава САВ-1, микротвердость АМГ-2 непрерывно уменьшается с набором флюенса, показывая линейную зависимость от логарифма потока нейтронов. Анализируя поведение микротвердости, можно предложить, что облучение приводит к деградации микротвердости АМГ-2, в то время как микротвердость сплава САВ-1 возрастает при флюенсе большем, чем 10^{19} см⁻² [1].

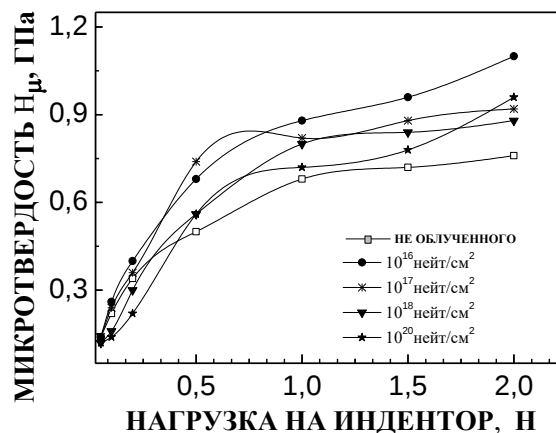
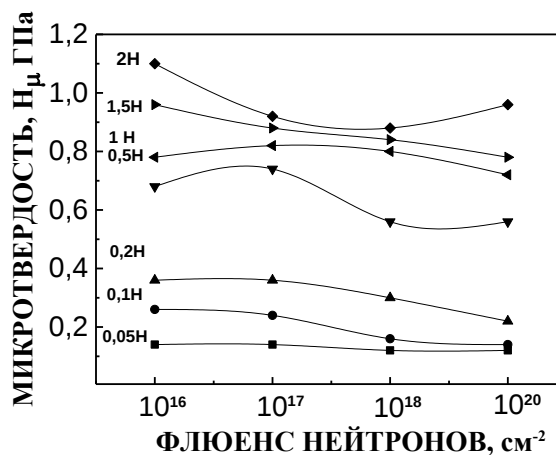

 Рисунок 4. Зависимость микротвердости образцов сплава АМГ-2 от нагрузки: (1) 10^{16} нейт/см², (2) 10^{17} нейт/см², (3) 10^{18} нейт/см², (4) 10^{20} нейт/см²


Рисунок 5. Зависимость микротвердости облученных образцов сплава АМГ-2 от флюенса нейтронов

Введение дефектов при ядерном облучении приводит к изменению кинетики и механизма изменения структуры твердых тел, чувствительной к нарушениям в сплавах и растворах, т.е. старение материала происходит и при ядерном облучении [12].

Нами обнаружена следующая закономерность изменения микротвердости в зависимости от флюенса нейтронов, и выявлена следующая эмпирическая формула:

$$H_{\mu} = -0,11 + 0,02 \ln F. \quad (2)$$

Эта формула позволяет с достаточной точностью определить микротвердость H_μ в труднодоступных местах конструкционных материалов реакторов, не нарушая целостность конструкции. Для этого достаточно определить расчетным путем флюенс нейтронов в данной точке конструкционных материалов.

В таблице 1 приведены наши экспериментальные данные микротвердости H_μ для необлученного и облученного сплава САВ-1 флюенсами 10^{16} , 10^{17} , 10^{18} и 10^{20} н/см² и расчетные данные с помощью эмпирической формулы микротвердости для флюенсов 10^{16} – 10^{22} н/см², а также приведены микротвердости H_μ для необлученного и облученного сплава САВ-1 из 2-х литературных данных. Наши данные для необлученных образцов совпадают со значениями приведенных литературных данных.

Таблица 1. Экспериментальные и расчетные данные микротвердости H_μ сплава САВ-1 в зависимости от флюенса нейтронов F , значения микротвердости H_μ при нагрузке 50 г

Флюенс F , н/см ²	Эксперимент, H_μ , ГПа	Наши расчеты, H_μ , ГПа
0	0,64 (настоящая работа)	
0	0,4 [1]	
0	0,6 [4]	
0	0,7 [13]	
10^{16}	0,80 (настоящая работа)	0,58
10^{17}	0,74 (настоящая работа)	0,62
10^{18}	0,72 (настоящая работа)	0,67
10^{19}		0,71
10^{20}	0,82 (настоящая работа)	0,76
$5,4 \cdot 10^{20}$	0,87 [13]	0,79
10^{21}	0,9 [4]	0,81
10^{22}	1,2 [4]	0,85

При больших дозах нейтронного облучения образцов экспериментальные значения их микротвердости H_μ хорошо согласуются с расчетными.

Изменения микропрочности сплава могут быть также связаны со значительным увеличением количества надатомных структур меньших размеров при разрушении более крупных и с образованием имеющих меньшие размеры фаз Mg_2Si в Al-матрице [3].

Обнаружена закономерность изменения микротвердости в зависимости от флюенса нейтронов, и выявлена эмпирическая формула, которая дает возможность оценить значение микротвердости в конструкционных материалах зная полученный флюенс быстрых нейтронов.

Так как при определении срока эксплуатации конструкционных материалов ядерных реакторов определяющую роль играют большие дозы нейтронов, мы выбрали эмпирическую формулу, которая хорошо согласуется при больших дозах нейтронов (более 10^{18} н/см²).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛЮМИНЕВОГО СПЛАВА САВ-1, ОБЛУЧЕННОГО БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ В ЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ

Обнаружена зависимость предела текучести ($\sigma_{0,2}$) сплава САВ-1 от флюенса нейтронов, а также выявлена аналитическая формула для расчета предела текучести образцов в зависимости от флюенсов нейтронов в диапазоне от 10^{16} до $3,5 \cdot 10^{22}$ н/см² (таблица 2):

$$\sigma_{0,2} = 49,8097 F^{0,0322}. \quad (3)$$

При дозе 10^{16} н/см² можно увидеть резкое увеличение предела текучести $\sigma_{0,2}$, при флюенсе 10^{17} н/см² – происходит уменьшение за счет радиационного отжига и зоны Гинье-Престона, в соответствии с [16].

Таблица 2. Экспериментальные и расчетные данные предела текучести ($\sigma_{0,2}$) сплава САВ-1 в зависимости от флюенса нейтронов (F)

Флюенс F , н/см ²	Расчет, $\sigma_{0,2}$, МПа	Эксперимент, $\sigma_{0,2}$, МПа	Примечание
10^{16}	151,47	180	настоящая работа
10^{17}	163,12	159	настоящая работа
10^{18}	175,68	162	настоящая работа
10^{19}	189,20		настоящая работа
10^{20}	203,76		настоящая работа
10^{21}	219,44	240	[14]
10^{22}	236,33	255	[15]

Из таблицы видно, что эмпирическая формула хорошо описывает результаты эксперимента.

При испытании образцов на растяжение определяют предел прочности (временное сопротивление) σ_b , предел текучести (физический) σ_t , предел текучести условный (технический) $\sigma_{0,2}$, предел пропорциональности $\sigma_{пл}$, предел упругости $\sigma_{уп}$, истинное сопротивление разрыву S_k , относительное удлинение δ и сужение ψ .

Обнаруженное различие между прочностью кристаллической решетки облученного и не облученного сплава объясняется, если предположить, что сплав САВ-1 представляет собой твердый раствор внедрения, поскольку кремний и магний не образуют химических соединений с алюминием [17]. Соответственно, атомы основных легирующих элементов кремния и магния увеличивают размер тех элементарных ячеек, в междоузлиях которых они располагаются.

В таблице 3 приведены условные напряжения деформации сплава САВ-1 при статическом растяжении, до и после облучения в реакторе ИБР-2 при разных флюенсах и литературные данные [14].

Нами выявлена закономерность зависимости предела текучести от величины микротвердости в диапазоне флюенса быстрых нейтронов от 10^{16} н/см² до 10^{23} н/см²:

$$\sigma_{0.2} = -3515,7668H_{\mu}^3 + 9461,3071H_{\mu}^2 - 8044,0815H_{\mu} + 2358,8189. \quad (4)$$

В таблице 4 приведены результаты расчетов предела текучести в зависимости от микротвердости по вышеуказанной формуле до флюенса 10^{23} н/см².

Таблица 3. Напряжение деформации сплава САВ-1 при статическом растяжении, до и после облучения в реакторе ИБР-2 при разных флюенсах

Флюенс F , н/см ²	Относительное удлинение δ , %	Напряжение-деформация Q , кг/мм ²
0	16	18,16
10^{16}	16,4	19,3
10^{17}	16,8	16,9
10^{18}	13,5	19,1
0 [14]	22,1	14
10^{17} [14]	25,2	15,2
10^{22} [14]	18,5	20,1

Таблица 4. Результаты расчетов предела текучести ($\sigma_{0.2}$) в зависимости от микротвердости по формуле (4) до флюенса (F) 10^{23} н/см²

Флюенс F , н/см ²	Эксперимент, H_{μ} , ГПа	Эксперимент, $\sigma_{0.2}$, МПа	Расчеты $\sigma_{0.2}$ через H_{μ} , МПа
10^{16}	0,8	180 (настоящая работа)	178,72
10^{17}	0,74	159 (настоящая работа)	162,54
10^{18}	0,72	162 (настоящая работа)	159,57
10^{19}	0,88		210,97
10^{20}	0,9		219,81
10^{21}	0,95	240 [14]	228,63
10^{22}	1,2	255 [15]	241,44
10^{23}			249,46

Полученные расчеты согласуются с экспериментальными данными: при малых дозах (10^{16} – 10^{19} н/см²) разница между данными в пределах 2%, при больших дозах (10^{20} – 10^{23} н/см²) – до 5%. Из этих данных можно сказать, что формула (4) при определении предела текучести $\sigma_{0.2}$ через значения микротвердости H_{μ} написана очень удачно. С помощью этой формулы можно предсказать срок эксплуатации конструкционного материала реактора основываясь на данные микротвердости. Микротвердость можно определять измерением мобильными твердомерами не разрушая конструкцию реактора.

4. ВЫВОДЫ

В результате исследования были обнаружены два интервала изменения микротвердости в зависимости от нагрузки на индентор, которые сохраняются во всем диапазоне набранных флюенсов. Сильная зависимость $H_{\mu}(P)$, вероятнее всего, обуславливается физико-химическим состоянием приповерхностного слоя. При нагрузках на индентор от 50 г и выше, зависимость микротвердости становится почти линейной. Из этого видно, что основные физико-химические процессы происходят на поверхности, поэтому

большое внимание уделялось измерениям поверхности образцов.

Анализ зависимостей H_{μ} от набранного флюенса нейтронов для сплава САВ-1 показал, что при дозах до 10^{18} см⁻² наблюдается уменьшение микротвердости (на 33%), с увеличением флюенса значения микротвердости вновь возрастают. Для сплава АМГ-2 также наблюдается снижение H_{μ} (на 10%), но меньше, чем для сплава САВ-1, оно сохраняется во всем исследованном диапазоне флюенсов. Это, по-видимому, связано с различным фазово-химическим составом сплавов.

Полученные экспериментальные результаты, а также закономерности, имеют важное значение как для практики, так и для фундаментальной науки. Эти данные позволяют построить модели воздействия нейтронного облучения на алюминиевые сплавы, выявить механизм деградации их механических свойств и, в конечном счете, прогнозировать эксплуатационные характеристики исследуемых сплавов.

Выявленные закономерности позволяют определить предел текучести (срок эксплуатации) конструкционных материалов в высокоактивных и труднодоступных частях конструкционных материалов ядерных реакторов неразрушающим методом с достаточной точностью. Это позволяет уменьшить риск получения больших доз персонала и повышает ядерную безопасность реакторов при эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

- У.С. Салихбаев, С.А. Байтелесов, И.Г. Хидиров, Ф.Р. Кунгуров, А.С. Саидов, В.Н. Сандалов. Влияние реакторного облучения на микроструктуру и микротвердость алюминиевых сплавов САВ-1 и АМГ-2. Журнал «Альтернативная энергетика и экология», №9 (65) 2008, с. 105–109
- В.М. Лебедев, В.Т. Лебедев, С.П. Орлов, Б.З. Марголин, А.М. Морозов. Исследование наноразмерной структуры сплава САВ-1, облученного быстрыми нейтронами до высоких флюенсов, методом малоуглового рассеяния нейтронов. Физика твердого тела, 2014, том 56, вып. 1, с. 160–164.
- В.М. Лебедев, В.Т. Лебедев, И.Н. Иванова, С.П. Орлов, Д.Н. Орлова. Структура алюминиевых сплавов, облученных нейтронами реактора. Физика твердого тела, 2010, том 52, вып. 5, с. 934–936.
- О.П. Максимкин, К.В. Цай, О.В. Рофман, Н.С. Сильягина. Влияние нейтронного облучения и пострadiaционного отжига на микроструктуру и свойства сплава Al–Mg–Si. Физика металлов и металловедение, 2016, том 117, № 9, с. 1–8.
- О.П. Максимкин, А.В. Яровчук, Д.С. Аулова, Л.Г. Турубарова, С.В. Карбышева. Коррозионная стойкость алюминиевого сплава САВ-1 после эксплуатации в активной зоне реактора ВВР-К и хранения в водном бассейне. Вопросы атомной науки и техники. – 2010. – № 5. – С. 78–83.
- О.П. Максимкин, А.В. Яровчук, Л.Г. Турубарова, Д.С. Аулова, С.А. Карбышева, А.В. Русакова. Влияние нейтронного облучения на межкристаллитную корро-

- зию и коррозионное растрескивание низколегированного алюминиевого сплава САВ-1 // Вопросы атомной науки и техники. – 2011. – № 2. – С. 108–115.
7. Глазов В.В. Микротвердость металлов. М. 1973, с. 272.
 8. В.Л. Аксенов, А.М. Балагуров, Г.Д. Бокучава и др., “Нейтронный фурье-дифрактометр ФСД для анализа внутренних напряжений: первые результаты”, Сообщение ОИЯИ Р13-2001-30 (2001).
 9. P. Hiismaki, V.A. Trounov, O. Antson et al., Neutron Scattering in the ‘Nineties, Conf. Proc., Vienna, IAEA (1985), p. 453.
 10. J. Schroder, V.A. Kudryashev, J.M. Keuter et al., New Developments of TOF Neutron Diffraction at the IBR-2 Pulsed Reactor J Neutron Research, 1994, v. 2, p.129.
 11. V.L. Aksenov, A.M. Balagurov, V.G. Simkin, V.A. Trounov, P. Hiismaki et al., Performance of the high resolution fourier diffractometer at the IBR2 pulsed reactor. J. Neutron Research, 1997, v. 5, p. 181.
 12. Краст Х.Б., Лайвинш А.Г., Бялобжеский А.В., Тиликс Ю.Е. Исследование алюминиевой оболочки отработанных твэлов реактора ИТР-200. // Ж. «Атомная энергия» т. 27, в. 4, 1969, с. 286–289.
 13. С.Н. Вотинов, Б.В. Шаров, С.В. Ярковой, В.К. Шамардин, Г.А. Серняев, В.М. Раецкий, А.С. Покровский. Ускорение структурных изменений в алюминиевом сплаве под действием реакторного облучения. Мелекес. – 1970. – с. 3–7.
 14. В.И. Диденко, К.А. Конопов, А.С. Полтавский, О.П. Якорев. Материаловедческие проблемы оценки срока службы конструкций исследовательских ядерных реакторов ВВР-М и ПИК. <http://www.pnpi.spb.ru/>
 15. Hajewska E. Investigation of the properties of aluminium alloys used in the construction of nuclear research reactors. Raport IAE-2155/VI, Otwock-S’wierk, 1993. pp. 39–41.
 16. Farrell K. and King R.T. Radiation-induced strengthening and embrittlement in aluminium // Metallurgical Transactions, 1973, v.4, № 5, pp. 1223–1231.
 17. А. Хофман, А.Ю. Дидык, В. Штеке, Е. Хаевска, Т. Вагнер, В.К. Семина. Влияние ядерных реакций на свойства сплавов Al-Mg-Si после длительной эксплуатации в исследовательских реакторах. Сообщ. ОИЯИ (Дубна) 2004, № Р14-2004-174. 10 с.
- REFERENCES**
1. U.S. Salikhbaev, S.A. Baytelesov, I.G. Khidirov, F.R. Kungurov, A.S. Saidov, V.N. Sandalov. Vliyanie reaktornogo oblucheniya na mikrostrukturu i mikrotverdst' alyuminievykh splavov SAV-1 i AMG-2. Zhurnal «Alternativnaya energetika i ekologiya». – 2008. – No. 9 (65). – P. 105–109
 2. V.M. Lebedev, V.T. Lebedev, S.P. Orlov, B.Z. Margolin, A.M. Morozov. Issledovanie nanorazmernoy struktury splava SAV-1, obluchennogo bystryimi neytronami do vysokikh flyuensov, metodom malouglovogo rasseyaniya neytronov. Fizika tverdogo tela, 2014. – Tom 56. – Issue 1. – P. 160–164.
 3. V.M. Lebedev, V.T. Lebedev, I.N. Ivanova, S.P. Orlov, D.N. Orlova. Struktura alyuminievykh splavov, obluchennykh neytronami reaktora. Fizika tverdogo tela. – 2010. – Tom 52. – Issue 5. – P. 934–936.
 4. O.P. Maksimkin, K.V. Tsay, O.V. Rofman, N.S. Sil'naygina. Vliyanie neytronnogo oblucheniya i postradiatsionnogo otzhiga na mikrostrukturu i svoystva splava Al-Mg-Si. Fizika metallov i metallovedenie. – 2016. – Tom 117. – No. 9. – P. 1–8.
 5. O.P. Maksimkin, A.V. Yarovchuk, D.S. Aulova, L.G. Turubarova, S.V. Karbysheva. Korroziionnaya stoykost' alyuminievogo splava SAV-1 posle ekspluatatsii v aktivnoy zone reaktora VVR-K i khraneniya v vodnom basseyne. Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. – 2010. – No. 5. – P. 78–83.
 6. O.P. Maksimkin, A.V. Yarovchuk, L.G. Turubarova, D.S. Aulova, S.A. Karbysheva, A.V. Rusakova Vliyanie neytronnogo oblucheniya na mezhkristallitnyuyu korroziyu i korroziionnoe rastreskivanie nizkolegirovannogo alyuminievogo splava SAV-1 // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. – 2011. – No. 2. – P. 108–115.
 7. Glazov V.V. Mikrotverdst' metallov. M. 1973, p. 272.
 8. V.L. Aksenov, A.M. Balagurov, G.D. Bokuchava i dr., “Neytronnyy fur'e-difraktometr FSD dlya analiza vnutrennikh napryazheniy: pervye rezul'taty”, Soobshchenie OIYaI R13-2001-30 (2001).
 9. P. Hiismaki, V.A. Trounov, O. Antson et al., Neutron Scattering in the ‘Nineties, Conf. Proc., Vienna, IAEA (1985), p. 453.
 10. J. Schroder, V.A. Kudryashev, J.M. Keuter et al., New Developments of TOF Neutron Diffraction at the IBR-2 Pulsed Reactor J Neutron Research. – 1994. – Vol. 2. – P.129.
 11. V.L. Aksenov, A.M. Balagurov, V.G. Simkin, V.A. Trounov, P. Hiismaki et al., Performance of the high resolution fourier diffractometer at the IBR2 pulsed reactor. J. Neutron Research. – 1997. Vol. 5. – P. 181.
 12. Krast Kh.B., Layvin'sh A.G., Byalobzheskiy A.V., Tiliks Yu.E. Issledovanie alyuminievoy obolochki otrabotannykh tvelov reaktora ITR-200. // Zh. «Atomnaya energiya». – 1969. – T. 27. – Issue 4. – P. 286–289.
 13. S.N. Votinov, B.V. Sharov, S.V. Yarkovoy, V.K. Shamardin, G.A. Sernyaev, V.M. Raetskiy, A.S. Pokrovskiy. Uskorenie strukturnykh izmeneniy v alyuminievom splave pod deystviem reaktornogo oblucheniya. Melekess. – 1970. – P. 3–7.
 14. V.I. Didenko, K.A. Konoplev, A.S. Poltavskiy, O.P. Yakorev. Materialovedcheskie problemy otsenki sroka sluzhby konstruktсий issledovatel'skikh yadernykh reaktorov VVR-M i PIK. <http://www.pnpi.spb.ru/>
 15. Hajewska E. Investigation of the properties of aluminium alloys used in the construction of nuclear research reactors. Raport IAE-2155/VI, Otwock-S’wierk, 1993. pp. 39–41.
 16. Farrell K. and King R.T. Radiation-induced strengthening and embrittlement in aluminium // Metallurgical Transactions. – 1973. Vol. 4. – No. 5. – P. 1223–1231.
 17. A. Khofman, A.Yu. Didyk, V. Shteke, E. Khaevska, T. Vagner, V.K. Semina. Vliyanie yadernykh reaktsiy na svoystva splavov Al-Mg-Si posle dlitel'noy ekspluatatsii v issledovatel'skikh reaktorakh. Soobshch. OIYaI (Dubna) 2004, No. R14-2004-174. 10 p.

САВ-1 АЛЮМИНИЯЛЫҚ ҚОРЫТМАЛАРДЫҢ НЕЙТРОНДАРМЕН СӘУЛЕЛЕНГЕН БЕРІКТІЛІГІНІҢ ӨЗГЕРІСТЕРІ

Ш. А. Аликулов, С. А. Байтелесов, Ф. Р. Кунгуров*, Д. П. Таджибаев, Д. Д. Тожибоев

Өзбекстан Республикасы Ғылым академиясының Ядролық физика институты

Байланыс үшін E-mail: fkungurov@inp.uz

Авторлар тобы 10^{16} – 10^{20} н/см² дозаларымен нейтронды сәулеленуге дейінгі және одан кейінгі САВ-1 алюминий қорытпасының күйлері мен радиациялық зақымдануын зерттеуді жүргізді. Өлшемдер көлемдік әдістермен (кіші бұрышты нейтрондардың шашырауы және нейтрондардың дифракциясы) құрылымдық күйдің тиеу машинасының көмегімен алынған үлгі беріктігін өлшеу нәтижелерімен корреляциясын талдау мақсатында жүргізілді. Беріктік параметрлерінің жылдам нейтрондардың ағынына байланысты заңдылықтары ашылып, беріктік параметрлерінің өзара тәуелділік заңдылықтары анықталды.

Түйін сөздер: алюминий қорытпасы САВ-1; нейтрондық сәулелену; нейтрондардың шашырауы; микроқұрылым; фазалық құрамы.

CHANGES IN THE STRENGTH OF SAV-1 ALUMINUM ALLOYS IRRADIATED BY NEUTRONS

Sh. A. Alikulov, S. A. Baytelesov, F. R. Kungurov*, D. P. Tadjibaev, D. D. Tojiboev

Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan

**E-mail for contacts: fkungurov@inp.uz*

A team of authors conducted a study of the states and radiation damage of aluminum alloy SAV-1 before and after neutron irradiation with doses of 10^{16} – 10^{20} n/cm². The measurements were carried out by volumetric methods (small-angle neutron scattering and neutron diffraction) in order to analyze the correlation of the structural state with the results of sample strength measurements obtained using a loading machine. The regularities depending on the fluence of fast neutrons of the strength parameters are revealed, and the regularities of the interdependence of the strength parameters are determined.

Keywords: aluminum alloy SAV-1; neutron irradiation; neutron scattering; microstructure; phase composition.