АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

На правах рукописи
УДК: 539.107

АЛИКУЛОВ ШЕРАЛИ АБДУСАЛОМОВИЧ

ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ТЕПЛО- И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени доктора философии (PhD)
по физико-математическим наукам

Научный руководитель:
Байтелесов Сапар Акимович,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Ташкент - 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ 3
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, ЕДИНИЦ ИЗМЕРЕНИЯ, СИМВОЛОВ И ТЕРМИНОВ 5
ВВЕДЕНИЕ 7
ГЛАВА I. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ 16
§ 1.1. Состав, структура и свойства алюминиевых сплавов 16
§1.2. Влияние нейтронного облучения на структуру и свойства алюминиевых сплавов 19
§1.3. Анализ литературного материала и постановка задачи исследования 33
ГЛАВА II. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ 35
§ 2.1. Характеристики объекта исследования 35
§2.2. Облучение образцов 37
§2.3. Методика измерения теплопроводности образцов 38
§2.4. Методика измерения электропроводности образцов 44
ГЛАВА III. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ САВ-1 И АМГ-2 48
§3.1. Коэффициент теплопроводности сплавов САВ-1 и АМГ-2 48
§ 3.2. Теплопроводность алюминиевых сплавов, облученных быстрыми нейтронами в ядерном реакторе 57
§3.3. Влияние примесей на теплопроводность алюминиевых сплавов САВ-1 и АМГ-2 70
§3.4. Выводы по главе 73
ГЛАВА IV. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ САВ-1 75
§4.1. Влияние концентрации элементов на электропроводность сплавов 75
§4.2. Электропроводность сплава САВ-1 76

§4.3. Электропроводность алюминиевых сплавов, облученных быстрыми нейтронами в ядерном реакторе 79
§4.4. Выводы по главе 85
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 86
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 88

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, ЕДИНИЦ ИЗМЕРЕНИЯ, СИМВОЛОВ И ТЕРМИНОВ

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;

$К_Т$ – тепловая проводимость пластин тепломера;

n_0– перепад температуры на образце в микровольтах, мкВ;

n_t– перепад температуры на рабочем слое тепломера в микровольтах, мкВ;

v_o– перепад температуры на образце, К;

v_t– перепад температуры на пластине, К;

S – площадь поперечного сечения образца, $м^2$;

h– толщина образца, м;

d – диаметр образца, м;

C_0 – полная теплоемкость испытуемого образца, Дж/кг·К;

C_C –полная теплоемкость стержня, Дж/К;

$C_Т$– полная теплоемкость пластины, Дж/К;

C_n– полная теплоемкость пластины контактной, Дж/К;

b – скорость разогрева измерительной ячейки, К/с;

$Q_0(\tau)$ – тепловой поток, проходящий через образец и поглощающий стержень, Вт;

$Q_Т(\tau)$ – тепловой поток, проходящий через среднее сечение пластины, Вт;

$К_Т$*–коэффициент пропорциональности, характеризующий эффективную тепловую проводимость пластины;

Р – тепловое сопротивление между стержнем и контактной пластиной, $м^2$ ·К/Вт;

$Р_0$– тепловое сопротивление образца, $м^2$К/Вт;

$Р_k$ – поправка, учитывающая тепловое сопротивление контакта, неидентичность и тепловое сопротивление заделки термопар, $м^2$К/Вт;

$C_0(t)$- ориентировочное значение удельной теплоемкости образца, Дж/кг·К;

m_0 – масса образца, кг;

$C_m(t)$ – удельная теплоемкость меди, Дж/кг·К;

m_c – масса стержня, кг;

ρ– удельное электросопротивление, Ом·м;

R– электросопротивление, Ом;

САВ-1– алюминиевый деформируемый сплав (система А1(97,6 - 98,6) - Mg (0,45 - 0,9) – Si (0,7 - 1,2))

АМГ - 2 – алюминиевый деформируемый сплав (система А1(95,7 - 98,2 –Mg (1,7 - 2,4) – Si (0,4))

ТВС − тепловыделяющая сборка

твэл − тепловыделяющий элемент

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время атомная энергетика представляет собой быстро развивающуюся отрасль мировой экономики. Этому основанием являются такие показатели как высокая эффективность источника энергии, экологичность, наличие богатого и относительно дешевого сырьевого ресурса в виде изотопов урана и тория, а также обеспеченность высокими технологиями управления всем производственным процессом и безопасностью. Ученые всего мира для обеспечения эффективной и безопасной эксплуатации атомных электростанций ведут интенсивные научные исследования по улучшению устойчивости составных конструкционных материалов энергоблоков к радиации, высокотемпературным нагревам и высоким давлениям. Конструкционные материалы активной зоны большинства из функционирующих реакторов, в том числе, и исследовательского реактора типа ВВР-СМ Института ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан изготовлены из сплавов алюминия САВ-1 и АМГ-2, а оболочечный материал - из сплава САВ-1. Оболочечный материал обеспечивает теплосъём с ядерного топлива, и служит барьером для удержания продуктов деления от выхода в теплоноситель в виде воды, заполняющей активную зону реактора. Это предохраняет активную зону реактора от расплавления при работе реактора на номинальной мощности 10 МВт.

В последнее время наблюдается тенденция роста цен на ядерное топливо, которая, в свою очередь, поставила на повестку дня вопрос об ещё более эффективном использовании ядерного топлива путем глубокого сжигания изотопа урана-235. Повышение степени выгорания урана-235 в ядерном топливе сделало актуальным определение теплопроводности оболочки ядерного топлива. Измерение теплопроводности оболочки отработанного ядерного топлива является технически трудной задачей. Из-за

непрекращающегося процесса ядерного деления в отработанном ядерном топливе в недрах оболочек продолжаются опасные для жизни человека гамма- и бета- ионизирующие излучения с большой активностью. Несмотря на существенные достижения в исследовании свойств конструкционных материалов реакторов, исследования закономерностей протекания радиационных процессов в них являются одной из актуальных проблем радиационного материаловедения.

В нашей Республике уделяется большое внимание использованию ядерной энергии в мирных целях, а также проведению фундаментальных и прикладных исследований в этом направлении на мировом уровне. Направления этих фундаментальных исследований, имеющих большое значение для развития науки и практического применения в атомной энергетики нашей страны, отражены в Стратегии1 действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 гг., а также в Концепции развития атомной энергетики в Республике Узбекистан на период 2019-2029 годов.

Исследования, проведенные в данной диссертационной работе, в определенной степени соответствуют задачам, предусмотренным в Указе Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 гг.» от 7 февраля 2017 года, Постановлениях Президента Республики Узбекистан №ПП-3682 «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы практического внедрения инновационных идей, технологий и проектов» от 27 апреля 2018 года, №ПП-3698 «О дополнительных мерах по совершенствованию механизмов внедрения инноваций в отрасли и сферы экономики» от 7 мая 2018 года, № ПП-4165 «Об утверждении концепции развития атомной энергетики в Республике Узбекистан на период 2019-2029

[1] Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 07 февраля 2017 г.

годов» от 7 февраля 2019 г., а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данном направлении.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий в Республике Узбекистан – II. «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

Степень изученности проблемы. Исследования радиационной стойкости различных конструкционных и углеродсодержащих композиционных материалов для перспективных высокотемпературных ядерных реакторов, а также влияния облучения на характеристики ядерных топливных элементов проводились ведущими учеными научно-исследовательских центров мира, в том числе американскими (Y.S. Kim, A. Yacout), российскими (К.А. Коноплев, С.Р. Фридман, С.П. Орлов, В.М. Лебедов, С.Н. Вотинов), казахстанскими (О.П. Максимкин, А.В. Яровчук, Л.Г. Турубарова), польскими (В. Штеке, Т. Вагнер, Е. Хаевска), израильскими (A. Minitz, A. Shtechman), украинскими (В.Н.Воеводин и др.), узбекистанскими (Р.Ханбеков, М. Сулаймонов, М. Жаматов, Т.Ашрапов, Х. Халилов, И. Абдукадырова) и другими специалистами.

В результате этих исследований установлено, что облучение быстрыми нейтронами изменяет прочностные свойства, коррозийную стойкость конструкционных материалов; обнаружен эффект ускорения старения сплава САВ-1 под действием высокого флюенса нейтронного облучения ($1{,}3 \cdot 10^{22}$ н/см^2) при температуре 353 К; показано, что прочностные свойства сплава САВ-1 зависят как от дозы облучения, так и, в гораздо большей степени, от температуры нагрева.

Однако на сегодняшний день не определен механизм воздействия нейтронного облучения на электро- и теплофизические свойства конструкционных материалов САВ-1 и АМГ-2 в ядерных реакторах типа

ВВР-СМ, не достигнуты гарантированные безопасные режимы их эксплуатации в ядерных реакторах.

Связь темы диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках научно-исследовательских проектов Института ядерной физики АН РУз по темам: ФА-Ф2-Ф070+Ф075 «Исследования специфических электрических, тепловых и механических свойств реакторных материалов и высокотемпературных сверхпроводников» (2012–2016), Ф2-ФА-Ф112 «Экспериментальное исследование свойств и состояний ядерной материи при высоких и низких энергиях» (2012–2016).

Целью исследования является установление закономерностей воздействия нейтронного облучения на тепло- и электрофизические свойства конструкционных материалов САВ-1 и АМГ-2 для ядерных реакторов.

Задачи исследования:

установить зависимость коэффициента теплопроводности сплава САВ-1 от температуры и флюенса быстрых нейтронов;

оценить вклад электронной составляющей в общую величину теплопроводности для конструкционных материалов САВ-1 и АМГ-2;

выявить зависимость удельной электропроводности от флюенса быстрых нейтронов и температуры для конструкционного материала САВ-1;

определить температуры Дебая для конструкционных сплавов САВ-1 и АМГ-2;

установить зависимость коэффициента Видемана-Франца конструкционных сплавов от флюенса нейтронов.

Объектом исследования являются образцы конструкционных материалов алюминиевых сплавов АМГ-2 и САВ-1.

Предметом исследования являются электро- и теплопроводность алюминиевых сплавов АМГ-2 и САВ-1.

Методы исследования. Теплопроводность сплавов измерялась динамическим калориметром в диапазоне температур 290 - 500 К (установка ИТ-λ-400), а электропроводность - четырехзондовым компенсационным методом (установка микроомметр типа 3207).

Научная новизна исследования заключается в следующем:

обнаружено радиационно-индуцированное уменьшение теплопроводности конструкционного сплава САВ-1 на 20% в диапазоне флюенса нейтронов 10^{16} - 10^{20} н/см^2, обусловленное дроблением интерметаллической фазы и насыщением сплава САВ-1 легирующими элементами;

определены температуры Дебая для конструкционных сплавов САВ-1 и АМГ-2, равные соответственно 406 К и 408 К, близкие к температуре Дебая чистого алюминия (394 К);

установлено, что нелинейная зависимость теплопроводности и коэффициента Видемана-Франца конструкционных сплавов САВ-1 и АМГ-2 от флюенса нейтронов до 10^{20} н/см^2 предопределена возникновением дополнительных фаз Mg_2Si в виде зон Гинье-Престона, когерентно связанных с матрицей;

выявлено, что характер роста электрического сопротивления в облученном нейтронами конструкционном сплаве САВ-1 в диапазоне температур от 290 до 500 К вызван дополнительным рассеянием носителей заряда на образованных дефектах в кристаллической решетке.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработан метод определения максимально допустимой температуры стенки тепловыделяющих элементов по измерению электропроводности конструкционного сплава САВ-1.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием апробированных современных методов измерения электропроводности и теплопроводности, а также большим объемом экспериментальных результатов с достаточной статистикой, их

согласованностью и непротиворечивостью выводов с результатами других авторов.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования заключается в том, что они вносят вклад в развитие радиационного материаловедения, в частности механизмы теплопроводности и электропроводности при средних и высоких флюенсах нейтронов и их роль в радиационных повреждениях конструкционных сплавов.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что они будут востребованы при определении максимального уровня выгорания U-235 в ядерном топливе, оценке предельно допустимых температур в активное зоне, а также при создании новых ядерных топливных материалов и радиационно-стойких конструкционных материалов с улучшенными параметрами для ядерных установок.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных результатов по исследованию влияния нейтронного облучения на тепло- и электрофизические свойства конструкционных материалов ядерного реактора:

выявленная закономерность уменьшения теплопроводности на 20 % при облучении сплава САВ-1 быстрыми нейтронами использована для определения максимально допустимой температуры ТВЭЛа и максимального выгорания U-235 на исследовательском ядерном реакторе ВВР-СМ ИЯФ АН РУз (Письмо АН РУз № 2/1255-361 от 04.02.2020 г.). Использование результатов позволило продлить срок эксплуатации ядерного топлива до 65 % выгорания урана-235;

результаты по определению температуры Дебая для конструкционных сплавов САВ-1 и АМГ-2 и зависимости теплопроводности и коэффициента Видемана-Франца конструкционного сплава САВ-1 от флюенса нейтронов использованы в рамках научно-исследовательского прикладного проекта ФА-Атех-2018-(175+170) «Разработка методов оптимизации топливных

циклов и контроля параметров ядерного реактора ВВР-СМ ИЯФ АН РУ» (2018-2020). Использование результатов позволило определить плотности потока быстрых нейтронов в каналах исследовательского реактора ВВР-СМ;

выявленный нелинейный характер роста электрического сопротивления в облученном нейтронами конструкционном сплаве САВ-1 в диапазоне температур от 290 до 500 К был использован на реакторе Ханоро Республики Корея (Письмо Корейского исследовательского института атомной энергии от 02.08.2019). Использование результатов позволило определить флюенсы быстрых нейтронов в облучаемых образцах.

Апробация результатов исследования. Результаты исследования были обсуждены на 3 международных и 4 Республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, из них 2 статьи в зарубежных научных журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 99 страниц.

Список опубликованных работ:

1. Абдукадырова И.Х., Аликулов Ш.А. Особенности процесса изменения теплопроводности обработанных в ядерном реакторе малыми дозами алюминиевых сплавов типа САВ-1 // Альтернативная энергетика и экология. – Россия, 2012. – №1(105). – С. 21–25.
2. Салихбаев У.С., Аликулов Ш.А., Ахмеджанов Ф.Р., Байтелесов С.А., Кунгуров Ф.Р., Болтабоев А.Ф. Влияние нейтронного облучения на теплопроводность алюминиевого сплава САВ-1 // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2013. – Т. 15, №3-4. – С. 197-203.

3. Alikulov Sh. A., Akhmedzhanov F.R., Baytelesov S.A., Boltabaev A.F., Kungurov F.R., Rakhimov E.T., Salikhbaev U.S. “High-Temperature Electric and Thermal Conductivity of the Aluminum Alloys SAV-1 and AMG-2” // Atomic Energy, 2015–Vol. 117, No 5, – P. 334-339.
4. Аликулов Ш.А., Ахмеджанов Ф.Р., Байтелесов С.А., Болтабоев А.Ф., Рахимов Э.Т., Салихбаев У.С. Действие нейтронного излучения на структуру и электропроводность алюминиевого сплава САВ-1 //Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2015. –Т. 17, №4. – С. 248-253.
5. Байтелесов С.А., Кунгуров Ф.Р., Рахимов Э.Т., Таджибаев Д.П., Аликулов Ш.А. Влияние реакторного излучения на теплопроводность конструкционного материала реактора САВ-1 // «Замонавий физиканинг долзарб муаммолари»: Республика ёш олимлар ва иқтидорли талабалар семинари материаллари. –Самарқанд, 2010. – С. 76-78.
6. Салихбаев У.С., Абдукадырова И.Х, Байтелесов С.А., Аликулов Ш.А. К вопросу о радиационном эффекте и теплофизических свойствах конструкционных сплавов // «Фундаментальные и прикладные вопросы физики»: Международная конференция, посвященная 80-летию академика М.С. Саидова. – Ташкент, 2010. – С. 370-372.
7. Абдукадырова И.Х., Байтелесов С.А., Аликулов Ш.А. О температурной зависимости теплофизических свойств конструкционных алюминиевых сплавов // «Ядерная и радиационная физика»: 8–я международная конференция. – Алматы, 2011 г. – С. 80.
8. Абдукадырова И.Х., Аликулов Ш.А. Влияние нейтронного излучения на теплофизические параметры некоторых конструкционных материалов // «Актуальные вопросы мирного использования атомной энергии»: Международная конференция молодых ученых и специалистов. – Алматы, 2012 г. – С.14-15.
9. AbdukadyrovaI.Kh., Alikulov Sh., Haydarov T., Boltaboev A.F. Effects of radiation on thermal and mechanical parameters of some construction

materials // “Nuclear Science and its Application” International Conference. – Samarkand, 2012. – P. 285-286.

10. Аликулов Ш.А. Влияние нейтронного облучения на теплопроводность алюминиевого сплава САВ-1 // «Физика и экология»: Республиканская научно - практическая конференция.– Нукус, 2013. – С. 15.
11. Akhmedzhanov F.R., Alikulov Sh.A., Baytelesov S.A., Boltabaev A.F., Kungurov F.R., Salikhbaev U.S. “Kinetics of radiation damages in SAV-1 alloy under neutron irradiation” 3rd European Nuclear Physics Conference (EuNPC), Groningen, Netherlands, 2015.– P.75.
12. Akhmedzhanov F.R., Alikulov Sh.A., Baytelesov S.A., Boltabaev A.F., Kungurov F.R., Salikhbaev U.S. Radiation damages in SAV-1 alloy under neutron irradiation // “New Trends of Development Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements and Prospects”: Book of abstracts of International Symposium. – Tashkent, 2016. –P. 244-245.
13. Аликулов Ш.А., Ахмеджанов Ф.Р., Байтелесов С.А., Болтабаев А.Ф, Кунгуров Ф.Р., Абдуманапов У.Ж., Бекбаев С.М. Влияние нейтронного излучения на электропроводность сплава САВ-1 // «Актуальные проблемы и тенденции инноваций в современной науке и образовании»: Материалы Международной научно–практической конференции.– Туркестан, 2017. – С. 479–481.
14. Аликулов Ш.А., Байтелесов С.А., Кунгуров Ф.Р. Зависимость удельного сопротивления сплава САВ-1 от флюенса быстрых нейтронов и от температуры // V Республиканская конференция молодых физиков Узбекистана “Ядерная физика и ядерные технологии”. – Ташкент, 2018. – С. 88-91.

ГЛАВА I. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

§ 1.1. Состав, структура и свойства алюминиевых сплавов

Сплавы системы Al-Mg-Si представляют собой термически упрочненные алюминиевые сплавы, которые могут деформироваться. Эти сплавы имеют хорошие свойства: высокую технологичность, коррозионную стойкость и достаточную прочность. В этих сплавах основными легирующими элементами являются Mg и Si, и дополнительно добавляются Cu, Mn, Cr, Zn и Ti для улучшения различных свойств. Упрочнение этих сплавов происходит главным образом из-за образования магния и кремния в процессе облучения [1; с.409-443, 2; с.196-276, 3; с.57-82].

Точное соотношение Mg:Si, требуемое для фазы Mg_2Si, составляет 1,73, но в сплавах содержится избыток либо магния, либо кремния. Соединение Mg_2Si имеет кубическую гранецентрированную решетку с параметром a= 6,35-6,40 Å. Добавка магния значительно улучшает прочность (при сварке) без снижения эластичности и коррозионной стойкости, но при его избытке понижается прочность. Кремний используется для повышения прочности и уменьшения склонности к образованию трещин во время сварки. При его избытке наблюдается улучшение прочности без снижения сварочной способности, но возникает некоторая склонность к межкристаллической коррозии. Марганец и хром вводятся для повышения прочности сплавов и нейтрализации негативного воздействия железа. Кроме того, присутствие хрома способствует выделению силицида хрома внутри зерен и препятствует их выделению на границах зерен и образованию приграничных зон, это помогает повысить коррозионную стойкость и поддерживать контроль размера зерен [1; с. 469-484, 2; с.304-326, 4; с.19-61]. Иногда добавляют некоторые количества меди и цинка с целью упрочнения без потери сопротивления коррозии. Цирконий и титан вводят для измельчения зерна в отливках и слитках, что значительно повышает прочность и улучшает

равномерность их свойств во всем объеме[1; с. 469-484, 2; с.304-326, 4; с.19-61, 5; с. 17-54].

Добавка титана в сплавах (измельчение зерна в отливках и слитках) повышает прочность и равномерность свойств во всем объеме. Теплопроводность металлов и сплавов состоит из двух компонентов: электронного и решеточного [6; с.197-215].

Электронный компонент связан с удельной электропроводностью через число Лоренца (закон Видемана-Франца). В работе [6; с.197-215] обсуждается проводимость решетки как функции температуры, точечных дефектов и электронной плотности. В алюминиевых сплавах вклад решеточного компонента небольшой.

Сплав Al 6061 по химическому составу очень близок к сплаву CAB-1. Изучена коррозионная стойкость металлического матричного композита из алюминиевого сплава (Al 6061) [7; с.31-35].

В качестве матричного материала использовался базовый сплав (Al-Mg-Si) (сплав Al 6061). Химический состав показан в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Химический состав сплавов Al 6061 и CAB-1 (состав, %)

Элементы	Mg	Si	Fe	Mn	Cu	Zn	Al
Al 6061	1,03	0,97	0,6	0,44	0,082	0,03	**остальное**
CAB-1	1,06	0,50	0,14	0,01	0,02	0,03	**остальное**

Коррозионное поведение алюминиевой матрицы композита в морской воде (3,5% раствор) было изучено с помощью потенциостатических поляризационных измерений. Было обнаружено, что добавление частиц SiC (карбида кремния) в матрицу алюминиевого сплава увеличивает скорость коррозии [7; с.31-35].

Исследована кинетика образования метастабильной фазы при распаде высоко насыщенных твердых частиц сплавов Al-Mg-Si [8; с.1576-1581]. Процесс был изучен путем измерения электрического сопротивления при

низких температурах (291-358 К), между 393-493 К - путем измерения модуля Юнга акустическим методом. Измерение модуля Юнга с высокой точностью позволило точно разделить последовательные этапы распада частиц pre-β″/β″- и β′ - фазы благодаря образованию зон Гинье-Престона. На основании результатов, полученных для характерной длительности стадий процесса при разных температурах, рассчитаны эффективные энергии активации. Показано, что энергия активации образования и эволюции частиц β″ фазы значительно ниже энергии активации легирующих элементов в условиях равновесия из-за вакансий.

В работе [9; с.1998-2004] изучено влияние микроструктуры на физико-механические свойства необлученного алюминиевого сплава 6201 системы Al−Mg−Si. Метод основан на интенсивной пластической деформации кручением под давлением в интервале температур 453-503 К. Сообщается, что ультрамелкозернистая структура с наноразмерными добавками вторичных фаз обеспечивает хорошее сочетание высокой прочности и электропроводности. Был проанализирован вклад различных механизмов в достижение упрочнения. Было установлено, что введение дополнительной плотности дислокаций (увеличение с $2 \cdot 10^{13}$ до $5 \cdot 10^{13} м^{-2}$), при сохранении основных параметров ультрамелкозернистой структуры, приводит к повышению прочности сплава на ~15%, при этом величина электропроводности сплава незначительно меняется.

В последние годы разрабатывается новый метод, который может значительно увеличить электропроводность и прочность алюминиевых сплавов [10; с.13-16, 11; с.109-115, 12; с.4501-4509].

Суть этого метода заключается в измельчении зерна посредством интенсивной пластической деформации и образовании твердого раствора нано частицами вторичной фазы во время динамического старения. Полученные образцы показали высокую механическую прочность благодаря упрочнению границ зерен и дисперсионному упрочнению в материале. Кроме того, уменьшение на порядок содержания растворенных атомов в

сплаве алюминиевой матрицы привело к увеличению электропроводности до уровня чистого алюминия [10; с.13-16, 11; с.109-115, 12; с.4501-4509].

§1.2. Влияние нейтронного облучения на структуру и свойства алюминиевых сплавов

Основным фактором, влияющим на физические и механические свойства в конструкционных материалах ядерных реакторов, является нейтронное облучение.

Нейтронное облучение образует пары Френкеля в сплавах. Межузельные атомы с большей подвижностью, чем вакансии, поглощаются в границе зерна или дислокациях. С ростом дозы нейтронного облучения плотность точечных дефектов и плотность дислокации увеличивается. Таким образом, образуется упругое напряжение благодаря избыточной концентрации вакансий в объеме сплавов [13; с.18-46, 14; с.235-243, 15; с.99-197, 16; с.691-709, 17; с.71-108, 18; с.1110-1150]. Плотность дислокации в сплаве увеличивается с увеличением раздробления интерметаллических соединений. Движению дислокации препятствуют границы зерен.

Сопротивление электрическому току обусловливается рассеянием электронов на несовершенствах кристаллов, таких, как точечные дефекты, примесные атомы, фононы, сложные дефекты кристалла. В частности, вакансию электрон «ощущает» как локальное искажение нормального периодического потенциала внутри кристалла. В общем случае удельное электрическое сопротивление зависит от средней длины свободного пробега электрона между столкновениями (l_e). Время свободного пробега электронов можно оценить через удельное электрическое сопротивление [19; с.148-152].

$$\rho = \frac{m^*}{e^2 n_0 l_\rho}, \qquad (1.1)$$

где m^* – эффективная масса электрона; e – заряд электрона; n_0 – плотность свободных электронов; l_ρ – время свободного пробега электрона в процессах переноса импульса.

Эффективная масса электронов в сплавах алюминия равна массе свободных электронов [20; с. 119-127]. В алюминии при нормальных условиях плотность свободных электронов $n_0=1{,}8\cdot10^{29}$ м$^{-3}$.

При температуре $T \ll \theta_D$ (θ_D – температура Дебая) время свободного пробега электрона в процессах переноса импульса τ_ρ и время свободного пробега электронов τ_e могут значительно отличаться [27; с.1-15]. Однако при $T \gg \theta_D$ время l_ρ и l_e становятся равными и время свободного пробега электронов можно рассчитать по соотношению (1.1), которое преобразуется к виду:

$$l_e = \frac{m^*}{e^2 n_0 \rho}, \qquad (1.2)$$

На рис. 1.1 видно [19; с.148-152], что с повышением флюенса время свободного пробега электронов уменьшается для образцов обоих сплавов.

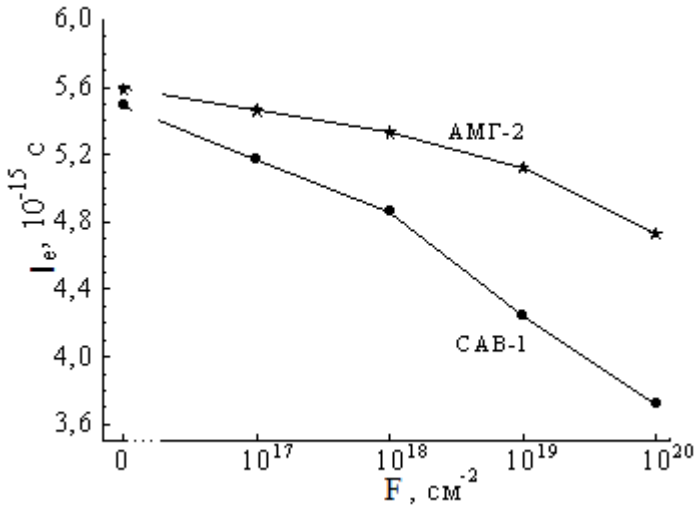


Рис. 1.1. Зависимость времени свободного пробега электронов от флюенса нейтронов в образце алюминиевого сплава САВ-1 (•), АМГ-2 (*), рассчитанная по формуле (1.2).

Сравнение показывает, что, несмотря на качественно одинаковый вид, имеются отличия. Уменьшение времени свободного пробега электронов для САВ-1 графически отображается в виде кривой с изломом в области флюенса 10^{18} н/см^2, в то время как для сплава АМГ-2 зависимость плавно нелинейно уменьшается во всем диапазоне измеренного флюенса. Относительное изменение времени свободного пробега электронов для САВ-1 больше, хотя изменение удельного сопротивления меньше, чем для АМГ-2. Эти различия, по-видимому, связаны, главным образом, с их химическим составом, например, с содержанием основных элементов (Si и Fe), включенных в сплавы для придания им пластичности. Поскольку время свободного пробега электронов обратно пропорционально концентрации ловушек, т.е. мелких дислокаций, межузельных атомов и вакансий, то можно предположить, что в облученном сплаве АМГ-2 их содержится больше, чем в САВ-1. Уменьшение свободного пробега носителей заряда свидетельствует о возрастании мелких дислокационных петель [19; с.148-152].

В работах [21; с.274-277, 22; с.342-347, 23; с.3-20, 24; с.4-22] представлены результаты изучения радиационной стойкости сплава САВ-1 - основного конструкционного материала ВВР-М. Показано, что в результате захвата тепловых нейтронов в алюминиевом сплаве происходит следующая реакция

$$^{27}\mathrm{Al}\ (n, \gamma) \longrightarrow {}^{28}\mathrm{Al} \longrightarrow {}^{28}\mathrm{Si},\quad (\beta\text{-распад}) T_{1/2} = 2{,}8 \text{ мин},$$

и накапливается избыточный кремний. Содержание кремния в сплаве определяли экспериментальным эмиссионно-спектрометрическим методом. Показано, что характеристики прочности и пластичности образцов сплава САВ-1 после нейтронного облучения, достигают 325 и 280 МПа, а общее удлинение уменьшилось с 2.6 до 3 %. На основе полученных механических характеристик алюминиевого сплава САВ-1 рассчитан срок службы опорной решетки и горизонтальных каналов ВВР-М.

В работах [25; с.934-936, 26; с.160-164] методом малоуглового рассеяния нейтронов исследована структура и показано, что в образцах сплава САВ-1 есть поры с характерным радиусом 5−50 нм. Обнаружено, что облучение вызывает заметное уменьшение объемной доли крупных рассеивающих структур радиусом 40−50 нм и, наряду с этим, увеличение доли фракций меньшего размера радиусом менее 20 нм. Показано, что под действием нейтронного облучения в сплаве суммарная объемная доля дефектов φ ~ 0,5% увеличивается на ~ 10% , а общая площадь поверхности дефектов S ≈ 0,6 м^2 возрастает на ~ 40%.

В работе [27; с.1-15] исследовано действие нейтронного облучения на сплав алюминия САВ-1, изучены прочностные характеристики (изменение микротвердости, удлинения, предела текучести), электросопротивление и теплопроводность. До облучения определено, что при термообработке в температурном интервале от 493 К до 523 К за исследованное время (до 40 часов) равновесное состояние сплава САВ-1 не достигается.

Показано, что облучение в реакторе при температуре ~ 333 К приводит к упрочнению сплава, росту его электросопротивления и снижению теплопроводности, а также нейтронное облучение увеличивает равновесную концентрацию дефектов. Изменение указанных характеристик, возможно, объясняется обеднением твердого раствора (появление новых зародышей, рост и совершенствование выделений) легирующими элементами и релаксацией напряжений в алюминиевой матрице за счет ускорения диффузионных процессов, вызываемых отжигом радиационных дефектов. Но при этом измерение проводилось только для образцов, облучённых флюенсом 10^{20} н/см^2 [27; с.1-15].

Исследована дозовая и температурная зависимость изменения теплопроводности конструкционного алюминиевого сплава [28; с. 89-95, 29; с.57-62], но при этом исследованы только образцы, облученные флюенсами 10^{18} н/см^2 и 10^{19} н/см^2. Выявлены основные закономерности изменения теплопроводности как функции температуры и флюенса, свидетельствующие

о ее нелинейном изменении. Установлена величина радиационных эффектов для теплопроводности, длины свободного пробега электрона и числа Лоренца. На основе полученных экспериментальных результатов сделано заключение, что общая теплопроводность вблизи комнатной температуры исходного сплава определяется, в основном, рассеянием электронов, и механизм этого процесса соответствует механизму Дебая. В облученном большими флюенсами быстрых нейтронов образце обнаружена значительная трансформация графиков теплопроводности, появление на них при разных температурах особых точек, обсуждаются причины выявленных аномалий. Оценено влияние реакторного излучения на функцию $L(T/\theta)$, определен положительный радиационный эффект для числа Лоренца и отрицательный для длины свободного пробега. Предполагается, что общая теплопроводность магналия при повышенных флюенсах и температурах определяется преимущественно рассеянием электронов на дефектах решетки, на фононах, и основной вклад в процесс переноса тепла вносит электронная составляющая.

При работе ядерных реакторов очень важно, чтобы материалы имели высокую коррозионную стойкость. В получении сведений о воздействии нейтронного облучения на конструкционные материалы реакторов важное место занимает изучение их физических и механических свойств, о чем свидетельствует возросший в последние годы объем информации, касающийся подобных исследований алюминиевых сплавов. В частности, в работе [30; с.108-115] сообщается о результатах исследований коррозионных свойств алюминиевого сплава САВ-1. Изучение поверхности облученных реакторных материалов показало, что нейтронное облучение приводит к коррозионным повреждениям в виде локальных дефектов, при этом доза облучения играет основную роль в повышении скорости коррозии конструкционного материала САВ-1. Обнаружено, что склонность к межкристаллитной коррозии (МКК) алюминиевого сплава САВ-1 увеличивается после облучения нейтронами и максимальную склонность

имеет сплав, получивший дозу облучения 10^{17} н/см^2. Причиной увеличения склонности к МКК является состояние структуры, определяемое как состояние, типичное для термически обработанного сплава в режиме «возврат при старении».

В работе [31; с.1-17] экспериментально были исследованы алюминиевые сплавы при нейтронном облучении, и изучена коррозионная стойкость при температурах 348 - 523 К. Показано, что изменение коррозионной стойкости и дефектов (в виде питтингов) зависит от флюенса нейтронов и температуры.

Исследована коррозия алюминиевого сплава Al 6061 после облучения гамма-квантами в дистиллированной воде, при дозе излучения до 206 кГр с использованием источника с гамма-квантами Co-60 [32; с.1-7]. Морфология и химический состав оксида, образовавшегося на поверхности облученных образцов, исследовались с использованием SEM-EDS. Поведение коррозии Al6061 оказалось зависимым от дозы в условиях эксперимента. Резкое изменение морфологии поверхности наблюдалось в образцах, подвергнутых облучению гамма-квантами при 206 кГр [31; с.1-17].

Результаты испытаний на электрохимическую коррозию показали, что потенциал коррозии может быть, несомненно, уменьшен за счет гамма-облучения, давая скорость коррозии $7 \cdot 10^{-4}$ мм / год [32; с.1-7].

В работе [33; с.78-83] изучена коррозионная стойкость материала тепловыделяющих сборок исследовательского реактора ВВР-К алюминиевого сплава САВ-1. Результаты свидетельствуют о том, что при эксплуатации и хранении отработанных конструкций ядерного реактора происходят изменения состояния поверхности и прочностных характеристик защитного покрытия и материала стержня. Определено, что прочность защитного покрытия материала САВ-1 снижается после нейтронного облучения. Обнаружены коррозионные дефекты не только на поверхности, но и в матричной основе стержня.

Обнаружен эффект ускорения старения сплава САВ-1 [34; с.1-8] под действием высокого флюенса нейтронного облучения (5 сна, $1{,}3 \cdot 10^{22}$ н/см^2) при температуре 353 К, выражающийся в образовании в материале множественных строчечных зон Гинье-Престона (неоднородным распределением концентраций примесей).

Показано, что прочностные свойства сплава САВ-1 зависят от дозы облучения и, в гораздо большей степени, от температуры нагрева. Наличие радиационно-состаренной микроструктуры в сплаве, облученном до 5 сна, обусловливает сохранение высокого значения $\sigma_{0,2}$ (предел текучести) после отжига при 473 К по сравнению со слабо облученным материалом (0,001 сна). После отжига при 673 К $\sigma_{0,2}$ и H_μ для облученных образцов сплава САВ-1 становятся близкими по величине к характеристикам необлученного материала. Микроструктура облученного сплава после отжигов при 673 К–423 К характеризуется наличием дислокаций и крупных выделений типа SiO и Mg_2Si. Таким образом, в результате отжига при температуре $\geq 0{,}6T_{пл}$ (рост зерен и первичных выделений в сплаве САВ-1 начинается с температуры 673 К ($\sim 0{,}6T_{пл}$)) эффект радиационно-термического упрочнения сплава САВ-1 исчезает независимо от степени предварительного облучения. Это свидетельствует о возможности применения процедуры отжига для восстановления свойств и структуры данного реакторного материала после длительного облучения [34; с.1-8].

В работах [35; с.105-109, 36; с.155-163, 37; с.153-158] изучено влияние реакторного облучения различными флюенсами 10^{17} – 10^{21} н/см^2 на микроструктуру и микротвёрдость сплавов САВ-1 и АМГ-2. Обнаружено, что реакторное облучение приводит практически к равномерному перераспределению основных примесей по всему образцу, ранее распределенных в исходных образцах неравномерно из-за естественного старения.

В таблице 1.2 приведено содержание основных элементов (в масс. %) в САВ-1 и АМГ-2 до и после облучения флюенсом 10^{17} – 10^{20} н/см^2. Среднее

значение обнаруженных элементов в составе необлученных образцов не соответствует паспортным данным САВ-1 и АМГ-2 [35; с.106]. В работе [35; с.105-109] это несоответствие объясняют перераспределением примесных элементов из-за естественного процесса старения, происходящего в сплавах при комнатной температуре.

Содержания элементов в образцах были измерены после спада их активности и мощности дозы гамма излучения до уровня 12 мкЗв/час [35; с.105-109, 36; с.155-163].

Таблица 1.2

Содержание основных элементов в образцах САВ-1 и АМГ-2 до и после облучения нейтронными потоками, н/см^2 (состав, %)

Образец	Флюенс, н/см^2	Al	Mg	Si	Mn	Fe	Cu
САВ-1	0	98,27	1,06	0,50	0,01	0,14	0,02
АМГ-2		96,57	2,80	0,10	0,24	0,25	0,04
САВ-1	10^{17}	97,77	0,82	1,10	0,01	0,28	0,02
АМГ-2		96,15	2,4	0,90	0,24	0,26	0,05
САВ-1	10^{18}	97,32	0,62	1,75		0,30	0,01
АМГ-2		95,74	2,02	1,70	0,23	0,25	0,06
САВ-1	10^{19}	97,09	0,53	2,05		0,32	0,01
АМГ-2		95,43	1,85	2,16	0,24	0,24	0,08
САВ-1	10^{20}	96,86	0,45	2,35		0,33	0,01
АМГ-2		95,27	1,68	2,52	0,22	0,23	0,08

На рис. 1.2 и 1.3 изображена микроструктура образцов САВ-1 до и после облучение нейтронами дозой в 10^{19} н/см^2 с распределением основных элементов Al, Mg, Fe и Si [35; с.105-109, 36; с.155-163].

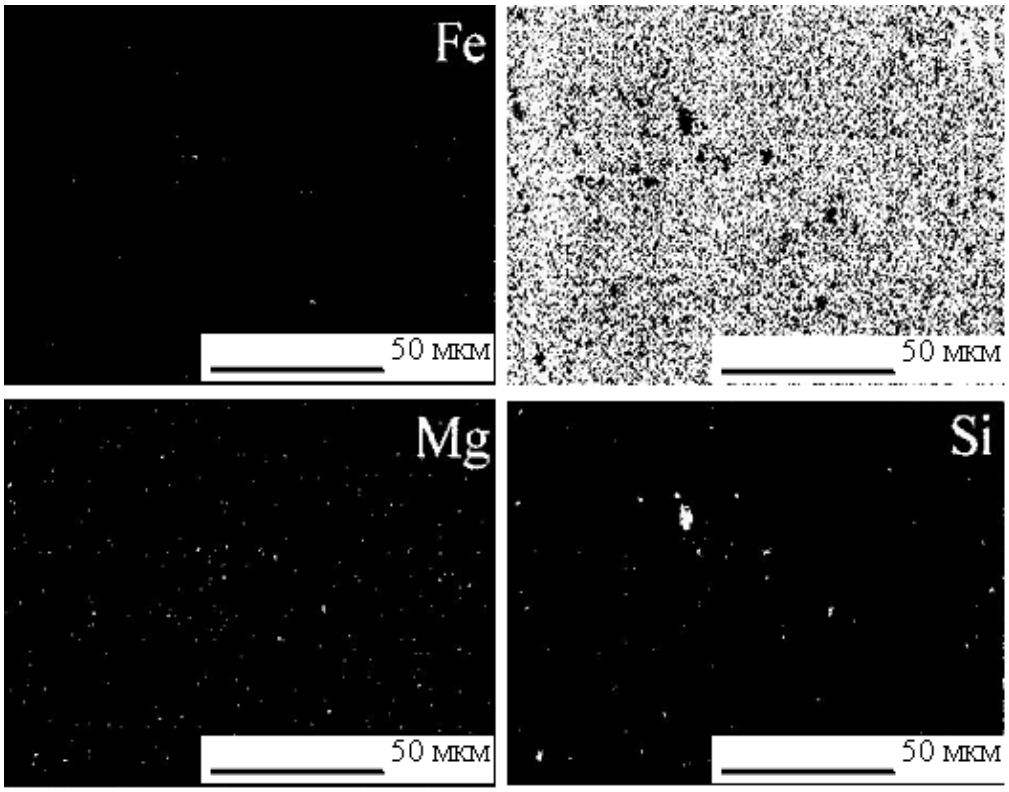


Рис.1.2. Микроструктура исходного сплава САВ-1 (до облучения)

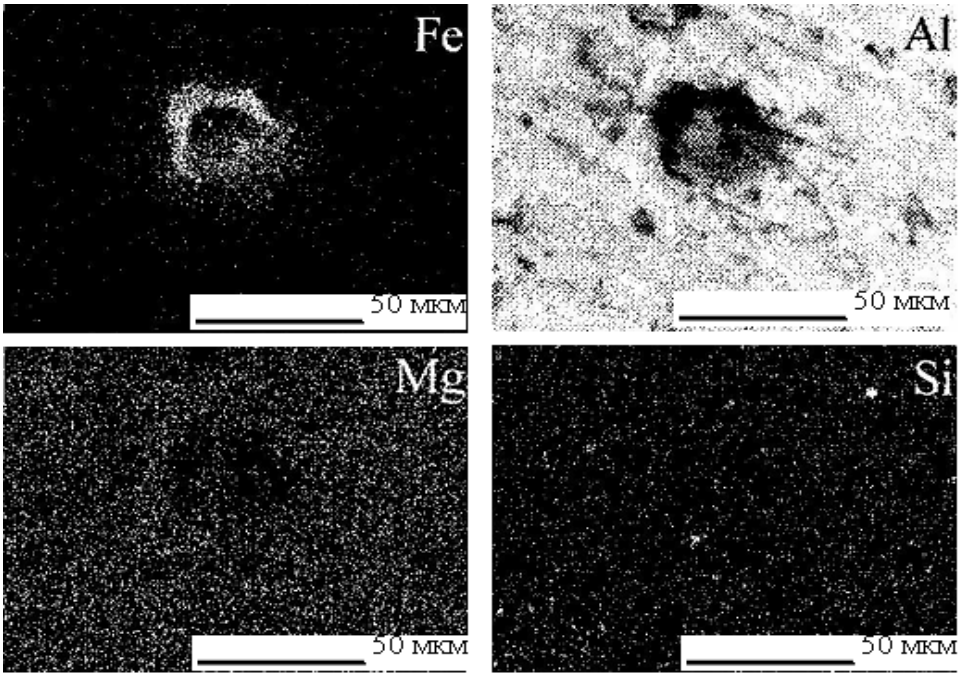


Рис.1.3. Микроструктура сплава САВ-1 после облучения флюенсом 10^{19} н/см^2

Авторами работы [35; с.105-109] выявлено значительное повышение микротвердости сплавов при облучении до дозы 10^{17} н/см^2 и линейный рост до 10^{20} н/см^2. Увеличение микротвердости объясняется раздроблением и рассеянием локальных нерастворимых интерметаллических фаз системы Al-Mg-Si-Fe по большому объему сплавов и ростом концентрации радиационных точечных дефектов с повышением флюенса [35; с.105-109].

В работах [38; с.23 -30, 39; с.39-41, 40; с.61-69, 41; с.71-76, 42; с.4198-4208, 43; с.415-423, 44; с.226-229, 45; с.127-132, 46; с.35-49, 47; с.286-289] экспериментально были исследованы радиационные эффекты (упрочнение, охрупчивание и ползучесть), распухание и упругие и физико-механические свойства сплава алюминия. Утверждается, что при анализе радиационных эффектов необходимо учитывать не только характеристики препятствий – дефектов кристаллической решетки, но и не в меньшей степени, параметры самой дислокации, такие как ее расщепленность, контролируемую величиной энергии дефекта упаковки. Определено, что воздействие нейтронного облучения на линейные размеры сплавов алюминия зависит не только от состава и концентрации примесей. Независимо от формы образца линейный размер его длинной стороны под воздействием нейтронного облучения сначала уменьшается, затем с увеличением флюенса нейтронов возрастает. Обнаружено, что нейтронное облучение воздействуют на механические свойства конструкционных материалов, повышая их прочность и снижая пластичность, а также изменяет кинетику старения. Результаты экспериментов показали, что высокие уровни радиации увеличивают скорость коррозионного разрушения алюминиевого сплава.

Авторами работы [48; с.1-13] исследовано влияние ядерных реакций на свойства сплавов Al–Mg–Si после 40 лет эксплуатации в реакторах. Показано, что нейтронное облучение меняет механические свойства: увеличение пределов текучести и прочности и уменьшение относительного удлинения в алюминиевых сплавах CAB-1, PAR-1 и Al-6063. Причина изменения механических свойств – старение сплавов Al–Mg–Si. Во время

облучения в реакции $^{27}Al(n,\gamma)^{28}Si$ нарабатывается Si. Присутствие Si повышает прочность алюминиевых сплавов. Радиационные дефекты, возникающие в алюминиевых сплавах под действием облучения нейтронами, зависят от энергии связи, температуры, потока нейтронов, а также от химического состава и структурного состояния материала. Исследования активности конструкционных элементов реактора EWA после облучения показали, что за счет ядерных реакций образуются изотопы с высокой активностью. Обнаружено, что основным фактором, влияющим на микроструктуру и механические свойства алюминиевых сплавов, является длительный термический отжиг в результате действия температуры во время облучения. Продолжительный отжиг в температурном интервале 313–333 К дает эффект, похожий на эффект облучения. В обоих случаях изменяется морфология поверхности излома от транс-кристаллической и межкристаллической структур. Причем, вклад межкристаллического режима разрушения увеличивается с ростом флюенса.

Сплавы Al-Mg-Si облучали ионами 5,4 МэВ Al, ионами 7,3 МэВ Fe, ионами 10 МэВ I и ионами Au 16 МэВ при комнатной температуре и измеряли микротвёрдость по Виккерсу [49; с.107-111]. Твердость сплавов Al-Mg-Si увеличивается с ростом ионного флюенса и различается в зависимости от вида облучающих ионов. Но по плотности упругой энергии, влияние этих четырех видов ионов на твердость почти одинакова. Этот результат означает, что действие облучения на твердость сплавов Al-Mg-Si доминирует за счет упругой энергии. Микроструктуру образцов, облученных ионами, исследовали с помощью трехмерного атомного зонда (3DAP). Экспериментальный результат сравнивали с микроструктурой и твердостью образцов после термического старения. Обсуждается различие ионно–индуцированного изменения твердости в сплавах Al-Mg-Si и Al-Cu-Mg.

В [50; с.112-117] показано структурное состояние сплава САВ-1 после длительного облучения; оно оказалось подобно закаленному (распределена равномерно). При этом наличие растворенного Mg не дает возможности

выделения Si по границам зерен. Фаза Mg_2Si распределена равномерно по телу зерна, что положительно влияет на эксплуатационные характеристики сплава. Эта фаза, по-видимому, связывает трансмутационный гелий, не давая ему возможности собираться в поры. Аналогичное влияние Mg_2Si на снижение порообразования отмечалось в [51; с.73-88], где мелкодисперсные фазовые выделения типа Mg_2Si рассматриваются как стоки для вакансий. Температура начала выделения гелия совпадает с температурой увеличения плотности выделений фазы Mg_2Si при отжиге облученных образцов.

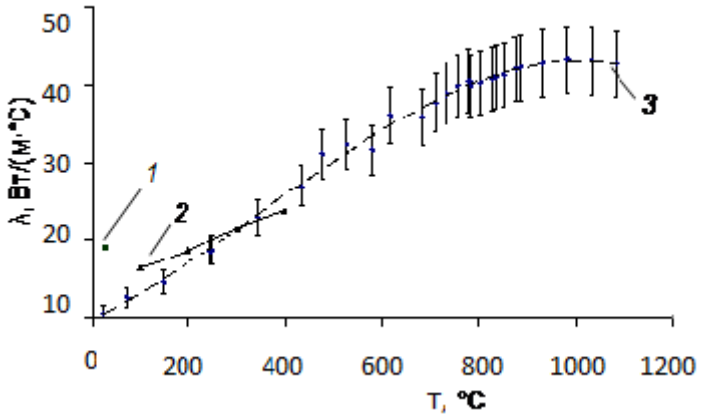
Проведенные испытания на польском сплаве PAR-1 как до, так и после облучения доказали пригодность этого сплава для строительства ядерных исследовательских реакторов [52; с.1-48]. Его свойства сопоставимы с таковыми для российского сплава CAB-1, химический состав которого был взят за основу в производстве польского сплава. Эксплуатационные характеристики сплава PAR-1 определены на образцах, взятых из структурного компонента (канал управляющего элемента) реактора EWA. В исследуемых областях радиационные дефекты не обнаружены, что объясняется восстановлением материала при рабочей температуре канала (333-353 К). В облученных образцах преципитаты были обнаружены, главным образом, внутри зерен, тогда как у необлученных образцов появлялись как на границах, так и внутри зерен. Сплав PAR-1, подвергнутый отжигу, показывает дуплексную структуру. Кроме того, преципитаты Mg_2Si являются более коагулированными и более равномерно распределенными внутри твердого раствора. Аналогичная структура была обнаружена в сплаве CAB-1. Испытания облученного PAR-1 сплава показали значительное увеличение прочности, сопровождающееся падением пластичности и рост результирующего фактора радиационного упрочнения. Результаты испытаний на чувствительность к хрупкому разрушению сплава PAR-1 указывают на падение вязкости хрупкого разрушения после продления времени искусственного старения до трех часов.

Исследовано влияние нейтронного облучения на механические свойства и морфологию разрушения, отработанного Al-6063 с использованием сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, и измерений на растяжение [53; с.79-88]. Металлографическое исследование и фрактография (изучение трещиноватых поверхностей) выявляют уменьшение конечной деформации трещины. Межкристаллитная область разрыва увеличивается с флюенсом. Плотность дислокаций Al уменьшается с флюенсом тепловых нейтронов. Длительный отжиг необлученного Al-6063 при 325 К показал аналогичные результаты. Таким образом, оказывается, что температура во время облучения является основным фактором, влияющим на механические свойства и микроструктуру.

В работах [54; с.10-15, 55; с.463-468] изучены влияния нейтронного облучения на микроструктуры металлов и сплавов, а также на распухание (если облучение приводит к образованию пар Френкеля). В алюминиевых сплавах после нейтронного облучения происходит эволюция их микроструктуры. Эти микроструктуры определяются возникновением пористости и развитием дислокации в алюминиевых сплавах. Показано, что длительное облучение твёрдых тел нейтронами, достаточными для образования пор точечных дефектов приводит к увеличению концентрации дефектов, что приводит к распуханию материала.

Изучено изменение теплопроводности оболочки уран-молибденого дисперсного ядерного топлива от температуры [56; с.576-582, 57; с.303-319, 58; с.22-30, 59; с.288-293, 60; с.1-24] и от концентрации компонентов в топливе. Установлено, что с повышением концентрации уран-молибдена теплопроводность уменьшается, а при повышении температуры теплопроводность незначительно увеличивается.

На рисунке 1.4 приведено изменение теплопроводности сплава U−Mo в зависимости от температуры [60;с.1-24].



1 − данные работы [58; с.30], 2 − данные работы [59; с.293], 3 − данные работы [60; с.24]

Рис.1.4. Температурная зависимость теплопроводности сплава U−Mo

Из приведенной зависимости видно увеличение теплопроводности с повышением температуры, что расширяет возможности сплава U−Mo по сравнению с другими высокоплотными композициями [60;с.1-24].

На основании проведенных комплексных исследований коррозионной стойкости сплава САВ-1 и анализа полученных результатов [31; с.1-17, 33; с.78-83, 34; с.1-8] можно сделать следующие выводы:

1. Коррозионная стойкость сплава САВ-1 зависит от дозы нейтронного воздействия, а также от условий облучения и стадии пострадиационного старения;

2. Влияние дозы нейтронного облучения на коррозионную стойкость САВ-1 необходимо рассматривать в совокупности со структурным состоянием сплава;

3. Термическая обработка сплава САВ-1 при 523 К способствует созданию более гомогенной структуры и повышает сопротивление образованию питтингов в растворе;

4. Механизм питтинговой коррозии сплава САВ-1 имеет электрохимическую природу и зависит от термодинамической стабильности сплава, которая определяется его структурным состоянием.

§ 1.3. Анализ литературного материала и постановка задачи исследования

На основе вышеизложенного анализа литературных данных следует заключить, что алюминиевый сплав САВ-1 широко используется в ядерных исследовательских реакторах как конструкционный материал активной зоны реактора, а также используется как матричный и оболочный материал ядерных топливных сборок.

В большинстве выше приведенных работ исследованы прочностные, коррозионные, структурные характеристики сплавов алюминия.

Работы, посвященные изучению теплопроводности и электропроводности САВ-1, единичные.

Плотность потока быстрых нейтронов с энергией E_n>0,8 *МэВ* в центральной ловушке нейтронов $1,4 \cdot 10^{15}$ н/см^2.

Измерение свойств сплава САВ-1 проводили в реакторе СМ-3 только для образцов, облучённых флюенсом 10^{20} н/см^2.

У нас также проводилось изучение свойств сплава САВ-1, но только для образцов, облучённых флюенсами 10^{18} н/см^2 и 10^{19} н/см^2.

Исследование алюминиевых сплавов САВ-1 в зависимости от дозы нейтронного облучения и температуры в диапазоне 10^{16}-10^{20} н/см^2 и 298 - 473 К не проводилось.

По созданию нового низкообогащенного уран-молибденового и других типов ядерного топлива исследуется теплопроводность только в зависимости от температуры. Работы по исследованиям влияния флюенса на теплопроводность уран-молибденовых топлив отсутствуют.

Разработанные в последние годы низкообогащенные ядерные топлива типа ИРТ-4М отличаются от высокообогащенного топлива ИРТ-3М. Размер топливного сердечника увеличился от 0,5 мм до 0,7 мм, толщина оболочки уменьшилась от 0,45мм до 0,3 мм. При этом завод-изготовитель ТВС дает

гарантию до 40% выгорания U-235, для экономии целесообразно довести выгорание до максимального безопасного уровня (65%).

Исходя из вышеизложенного, целью настоящей работы является изучение влияния нейтронного облучения на тепловые и электрофизические свойства конструкционных материалов ядерного реактора.

Для этого необходимо было решать следующие задачи:

установить зависимость коэффициента теплопроводности сплава САВ-1 от температуры и флюенса быстрых нейтронов;

оценить вклад электронной составляющей в общую величину теплопроводности для конструкционных материалов САВ-1 и АМГ-2;

выявить зависимость удельной электропроводности от флюенса быстрых нейтронов и температуры для конструкционного материала САВ-1;

определить температуры Дебая для конструкционных сплавов САВ-1 и АМГ-2;

установить зависимость коэффициента Видемана-Франца конструкционных сплавов от флюенса нейтронов.

ГЛАВА II. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

§ 2.1. Характеристики объекта исследования

Объектами исследования являлись образцы конструкционных алюминиевых сплавов САВ-1 и АМГ-2.

В настоящее время в ядерных реакторах различного типа в качестве конструкционного материала широко используются алюминиевые сплавы, выгодно отличающиеся от других сплавов своими физико-механическими свойствами, в частности, прочностью, высокой пластичностью, устойчивостью к коррозии и большим запасом ползучести. В их числе сплавы АМГ-2 и САВ-1 относятся к группе алюминиевых деформируемых сплавов тройной системы Al−Mg−Si. Физические свойства этих сплавов зависят, прежде всего, от соотношения концентраций алюминия и основных легирующих элементов – магния и кремния. Поэтому основными фазами являются (Al)+ Mg_2Si + Si. Кроме того, в таких сплавах могут быть различные интерметаллические соединения, например, AlSiMnFe, AlSiFe, $CuAl_2$, Mg_2Si и другие [33; с.78-83, 61- 63].

Как и все сплавы системы Al-Mg-Si, сплавы САВ-1 и АМГ-2 менее всего подвержены радиационному повреждению при воздействии больших нейтронных потоков и отличаются от первоначальной марки АВ (авиаль) малым содержанием примесей. В таблице 2.1 приведен химический состав сплавов САВ-1 (ОСТ 1-90048-90, ТУ 1-5-140-78) и АМГ-2 и АВ (ГОСТ 4784-74, ТУ 1-83-75-90).

Вследствие этого сплавы САВ-1 и АМГ-2, несмотря на низкую температуру плавления, имеют высокую теплопроводность и слабую подверженность радиационному повреждению, это позволяет эксплуатировать конструкции на их основе при значительных тепловых и радиационных нагрузках. В частности, они применяется в качестве

конструкционного материала для изготовления защитных оболочек тепловыделяющих элементов и стержней защиты управления (СУЗ), трубопроводов, баков, и различных вспомогательных конструкций в активной зоне атомных реакторов [30; с.78-83, 62-68].

Таблица 2.1

Химический состав алюминиевых сплавов САВ-1, АМГ-2 и АВ.

Сплав	Состав, %										
	Основные компоненты			Примеси, не более							
	Al	Mg	Si	Fe	Mn	Cu	Cr	Ti	Ni	Cd	Zn
САВ-1	97,6–98,6	0,45–0,9	0,7–1,2	0,2	0,012	0,012	–	0,012	0,03	0,001	0,03
АМГ-2	95,7–98,2	1,7–2,4	0,4	0,5	0,1–0,5	0,15	0,04–0,35	0,15	–	–	0,15
АВ	96,2–97,95	0,45–0,9	0,5–1,2	0,5	0,15–0,35	0,10–0,5	0,25	0,15	–	-	0,2

Удаление тепла из ядерного реактора зависит от тепловых свойств реакторных материалов. В свою очередь, эти свойства могут изменяться вследствие радиационных повреждений материалов в активной зоне реактора. Теплопроводность – это основная тепловая характеристика в процессах теплопередачи, например, от топлива к оболочке ТВЭЛа [70; с.67-71, 71; с.742-750, 72; с. 17-55].

При облучении сплава САВ-1, в результате ядерных реакций, вызванных нейтронами, меняются содержания кремния и других элементов, соответственно, соотношение фаз в сплаве [25; с.934-936, 35; с.105-109, 69; с.1705-1709], способствующие появлению микропор (трещин) и ухудшению не только прочностных, но и тепловых свойств материала.

В результате многолетнего опыта эксплуатации в качестве основного конструкционного материала исследовательских ядерных реакторов (ИЯР) типа ВВР-С выбран сплав САВ-1 [64; с.3-9]. В исследовательском реакторе ВВР-СМ (г. Ташкент, Узбекистан) сплав САВ-1 служит основным

материалом активной зоны, из него изготовлены ТВЭЛы и элементы внутри корпусных устройств.

В таблице № 2.2 приведены результаты измерений теплопроводности образцов САВ-1.

Таблица 2.2

Химический состав, толщины и коэффициент теплопроводности образцов алюминиевых сплавов САВ-1

Масса образца, г	Толщина образца, мм	Массовая доля элементов, %						λ_0, Вт / (м · К)
		Al	Si	Mg	Mn	Fe	Cu	
1,489	3,53	98,41	0,46	1	<0,01	0,14	<0,01	173
1,367	2,93	98,42	0,45	1	<0,01	0,14	<0,01	157
1,196	2,78	98,42	0,44	1	<0,01	0,15	<0,01	146

§2.2. Облучение образцов

Для облучения нейтронами в диапазоне флюенсов от 10^{16} до 10^{20} н/см^2 были подготовлены и отожжены образцы конструкционных материалов САВ-1 и АМГ-2. Отжиг образцов проводился в муфельной печи с целью приведения сплава в более равновесное структурное состояние, снятия внутренних напряжений и рекристаллизации.

Максимальная температура отжига составляла от 725 К до 773 К, перед загрузкой в активную зону реактора образцы после отжига взвешивались на аналитических весах и их размеры измерялись микрометром, а также образцы подвергались шлифовке для измерения их теплопроводности. Затем они промывались этиловым спиртом и дистиллированной водой.

Для облучения быстрыми нейтронами образцы размещались в одном из вертикальных каналов исследовательского реактора ВВР-СМ ИЯФ АН РУ с измененной схемой загрузки при мощности 10 МВт. Использовались

вертикальные каналы 3-8 и 2 в активной зоне реактора. Плотность потока быстрых нейтронов (E_n> 0,8*МэВ*) в канале составляла $7{,}84 \cdot 10^{12}$ н/(см^2·с) и $3{,}3 \cdot 10^{12}$ н/(см^2·с).

На рисунке 2.1 показана активная зона реактора ВВР-СМ и вертикальный канал 2.

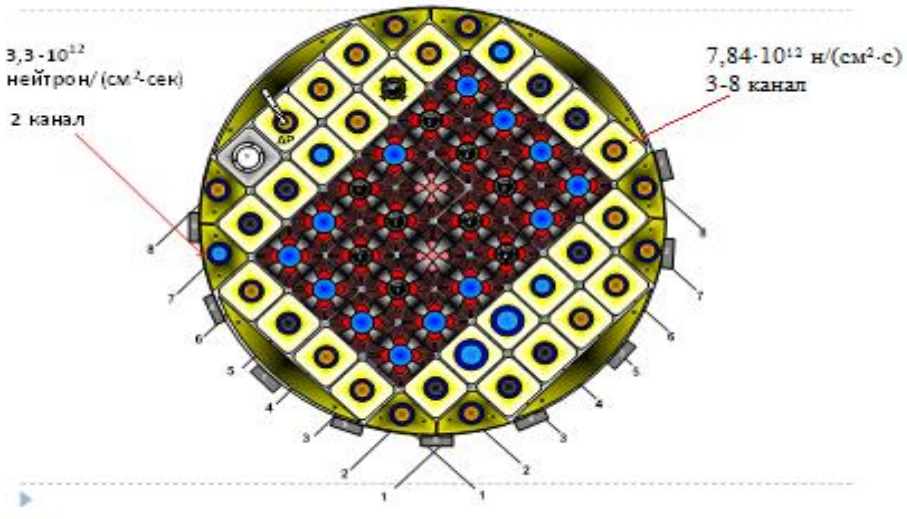


Рис. 2.1 . Активная зона реактора ВВР-СМ АН РУз

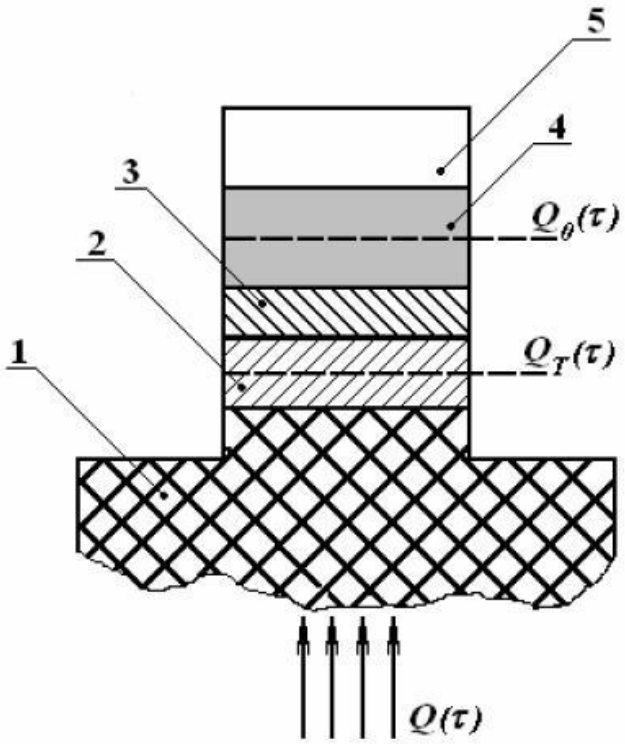
Цифры вокруг активной зоны обозначают номера вертикальных каналов.

Время выдержки образцов в канале в зависимости от суммарной дозы облучения (флюенсы нейтронов от 10^{16} см$^{-2}$ до 10^{20} н/см^2) варьировалось от двух часов до года. Температура в канале придерживалась около 318 К. Отвод тепла, выделяющегося вследствие радиационного нагрева, осуществлялся за счет циркуляции воды первого контура объемной скоростью 1250 м^3/час.

§2.3. Методика измерения теплопроводности образцов

Метод измерения теплопроводности образцов основан на использовании динамического калориметра [73; с. 2-35, 74; с.22-30, 75; с.156-182, 76; с.14-23, 77; с. 78-97, 78; с.21-30].

На рисунке 2.2 показана схема измерения теплопроводности на измерителе ИТ-λ-400.



1 - основание, 2 - пластина, 3 - пластина контактная, 4 - образец, 5 - стержень

Рис.2.2. Схема измерения теплопроводности на измерителе ИТ-λ-400

Описание метода приводится в работе [73; с. 9-12], где говорится, что тепловым потоком, поступающим от основания, медленно разогреваются образец, пластина контактная и стержень. Стержень и пластина контактная изготовлены из меди, обладающей высокой теплопроводностью, поэтому перепады температуры на них незначительны. Тепловой поток, проходящий через среднее сечение пластины, частично поглощается ею и далее идет на разогрев пластины, образца и стержня. Общий вид измерителя и установка образцов в ИТ-λ-400 приведены на рисунках 2.3, 2.4, 2.5 [73; с. 9-12].

Рис. 2.3. Общий вид измерителя теплопроводности ИТ-λ-400

Рис. 2.4.Установка образцов в ИТ-λ-400

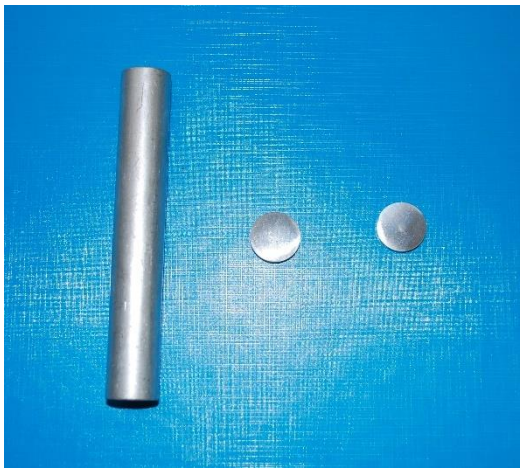


Рис. 2.5. Изучаемые образцы

Для тепловых потоков $Q_o(\tau)$, $Q_t(\tau)$ и любого уровня температуры справедливы формулы:

$$Q_0(\tau) = \frac{V_0 S}{P} = (\frac{1}{2} C_0 + C_c) b \qquad (2.1)$$

где $Q_o(\tau)$ – тепловой поток, проходящий через образец и поглощающий стержень, V_0– перепад температуры на образце, P – тепловое сопротивление между стержнем и контактной пластиной, C_o– полная теплоемкость образца, C_c - полная теплоемкость стержня, b- скорость разогрева измерительной ячейки, S-площадь поперечного сечения образца [73; с. 2-35].

$$Q_t(\tau) = K_T^* v_t = (\frac{1}{2} C_T + C_n + C_c) b \qquad (2.2)$$

где $Q_t(\tau)$- тепловой поток, проходящий через среднее сечение пластины (2), K_t – коэффициент пропорциональности, характеризующий эффективную тепловую проводимость пластины (2), v_t– перепад температуры на пластине (2), C_T - полная теплоемкость пластины (2), C_n - полная теплоемкость пластины контактной (3) [73; с. 2-35].

Тепловое сопротивление между стержнем и контактной пластиной определяется по формуле:

$$P = P_0 + P_k \qquad (2.3)$$

где P_0 - тепловое сопротивление образца, P_k – поправка, учитывающая тепловое сопротивление контакта, неидентичность и тепловое сопротивление заделки термопар [73; с. 2-35].

Тепловое сопротивление образца определяется по формуле [73; с. 2-35]:

$$P_0 = \frac{h}{\lambda} \qquad (2.4)$$

где h- высота образца, λ-теплопроводность образца.

На основании формул (2.1) ÷ (2.4) получается

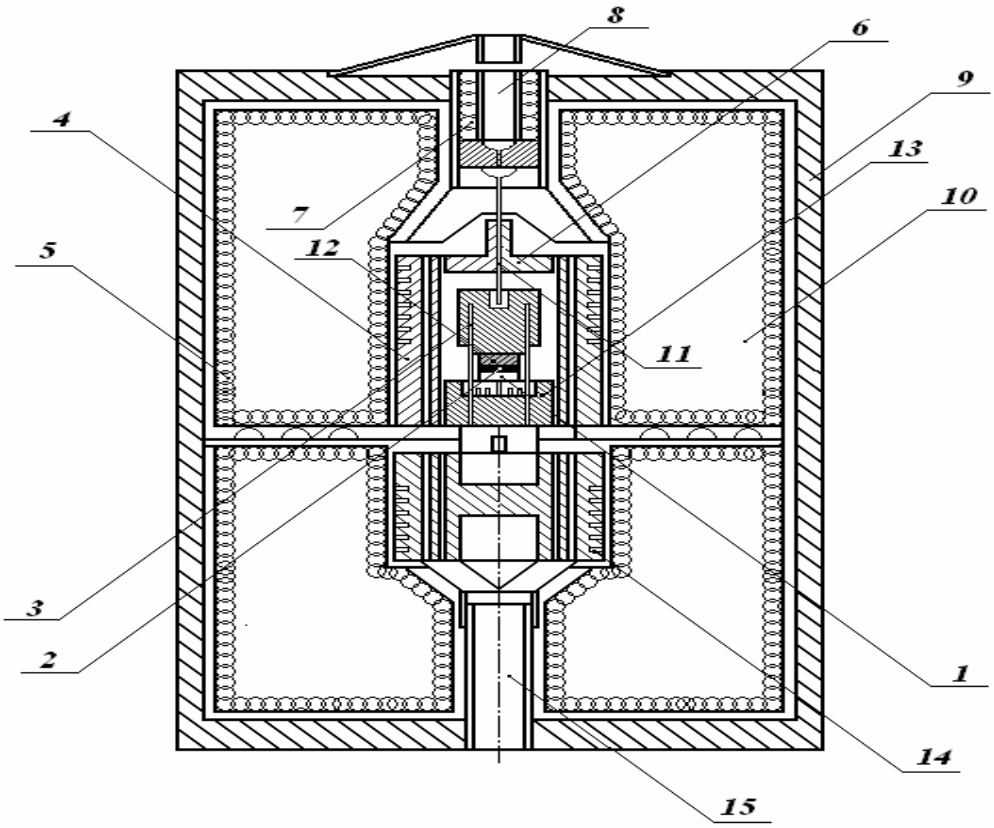
$$P_0 = \frac{V_0 S(1+\sigma_c)}{V_t K_T} - P_k \qquad (2.5)$$

Влияние σ_c обычно не превышает 5÷10% и может оцениваться по ориентировочным данным теплоемкости образца. Значение тепловой проводимости пластины определяется по следующей формуле [73; с. 2-35]:

$$\lambda = \frac{h}{P_0} \qquad (2.6)$$

Прибор ИТ-λ-400 [73; с. 12-15] предназначен для измерения теплофизических свойств. Блок питания и регулирования обеспечивает нагрев измерительной ячейки со средней скоростью около 0,1 К/с и автоматическое регулирование температуры. Режим медленного нагрева

позволяет получать сразу температурную зависимость изучаемого параметра. На рисунке 2.6 показана измерительная ячейка. На медном основании (13) размещены термопары (3), пластина (1), контактная пластина (2), составляющие тепломер, и испытуемый образец (12). Основание (13) и блок нагревательный (14) соединены винтами и специальной крестообразной деталью крепятся к нижней половине корпуса измерительной ячейки [73; с. 12-31].



1 - пластина; 2 - пластина контактная; 3 - термопара; 4 - колпак охранный; 5 - коробка из фольги; 6 - прижим; 7 - пружина; 8 - патрубок; 9 - корпус; 10 - оболочка теплозащитная; 11 - стержень; 12 - образец испытуемый; 13 - основание; 14 - блок нагревательный; 15 - патрубок

Рис. 2.6. Измерительная ячейка

Методика измерения отличается простотой и точностью. Образцы (диаметр d=15 мм, высота от h=2,0 мм до h=3,5 мм) тщательно шлифовались, затем обрабатывались алюминиевой пудрой для герметизации поверхности

слоя образцов, благодаря чему на поверхности образуется плотная пленка, которая предотвращает попадание влаги.

После реакторного облучения образцы перед измерением промывались холодной дистиллированной водой и подвергались шлифовке (при необходимости).

Перед загрузкой в активную зону реактора определялась масса образцов на аналитических весах, и измерялись их размеры микрометром. По результатам этих измерений определялась плотность образцов, которая в среднем составила 2,88 и 2,82 г/см^3 для САВ-1 и АМГ-2, соответственно. Для определения изменения процентного соотношения составляющих элементов в сплаве САВ-1 под действием облучения нейтронами производился анализ состава исследованных образцов как до, так и после облучения.

Сплавы имеют гранецентрированную кубическую структуру с параметром решетки a = 0,406 нм и 0,407 нм. Определение элементного состава проводилось на рентгеновском микроанализаторе «Jeol» JSM 5910 IV (Япония) [35; с.105-109].

Величина коэффициента теплопроводности λ рассчитывалась по результатам измерения толщины, площади сечения дисковых образцов и перепада температур в образце и тепломере, с помощью соотношения [73; с.1-35]:

$$\lambda = K_T \cdot \frac{n_t}{n_0} \cdot \frac{h}{S(1+\sigma_c)} \qquad (2.7)$$

При определении тепловой проводимости тепломера K_T в качестве эталона теплопроводности использовался химически чистый медный образец. В формуле (2.7) не учитывалось влияние удельного контактного теплового сопротивления P_k, относительный вклад которого в общее тепловое сопротивление образца и стержня-тепломера пренебрежимо мал. Коэффициент теплопроводности определялся с погрешностью не более 10%.

§2.4. Методика измерения электропроводности образцов

Исследования проводились на образцах алюминиевого сплава САВ-1 промышленной поставки, имеющих цилиндрическую форму диаметром 8 мм и длиной 100 мм. Плотность образцов САВ-1 определялась с погрешностью 0,1% по измерениям их массы на аналитических весах и линейных размеров с помощью микрометра.

Для облучения быстрыми нейтронами образцы размещались в одном из вертикальных каналов исследовательского реактора ВВР-СМ ИЯФ АН РУ с измененной схемой загрузки при мощности 10 МВт [79; с.269-273]. Использовались вертикальные каналы 3-8 и 2 в активной зоне реактора. Плотность потока быстрых нейтронов (E_n> 0,8 *МэВ*) в канале составляла $7{,}84\cdot10^{12}$ н/(см^2·с) и $3{,}3\cdot10^{12}$ н/(см^2·с).

Время выдержки образцов в канале в зависимости от суммарной дозы облучения (флюенсы нейтронов от 10^{16} н/см^2 до 10^{20} н/см^2) варьировалось от двух часов до года. Температура в канале придерживалась около 318 К. Отвод тепла, выделяющегося вследствие радиационного нагрева, осуществлялся за счет циркуляции воды первого контура объемной скоростью 1250 м^3/час [79; с.269-273].

Измерение электропроводности образцов проводилось микроомметром типа 3207, а также четырехзондовым компенсационным методом [80; с.216].

Микроомметр [80; с.216, 108; p.35] типа 3207 - это полностью цифровой микроомметр с 4½ разрядным светодиодным дисплеем, способный измерять низкое сопротивление с разрешением 0,1 мкОм, имеет международный сертификат ISO 90001. Этот метод используется для устранения влияния сопротивления выводов на точность измерений. Это очень надежный, мощный инструмент для тяжелых условий эксплуатации. Это инструмент прямого считывания, позволяющий выполнять простые, быстрые и точные измерения. К важным характеристикам микроомметра модели 3207 относятся:

1. Точность: ± (0,5%) для 2 мОм и ± (0,05%) для других диапазонов.

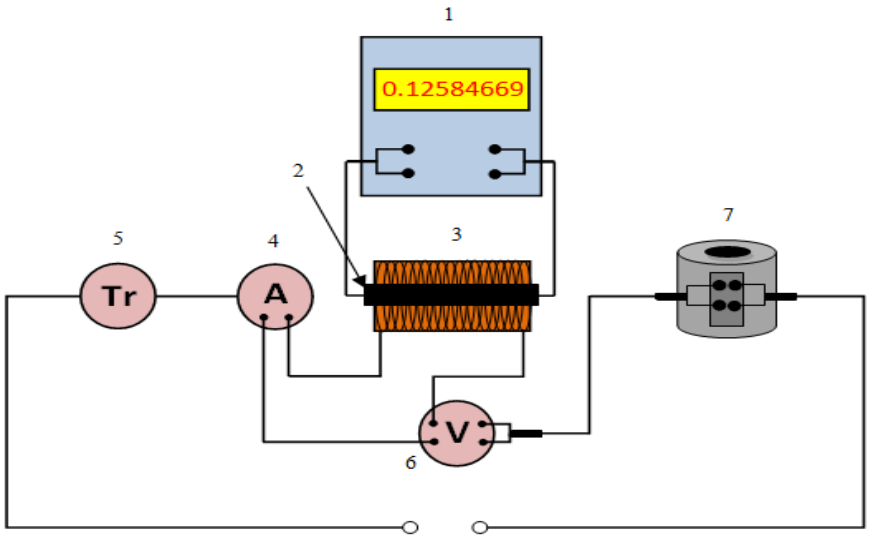
2. Работа в импульсном режиме

3. Цифровой 4½ разрядный светодиодный прибор для прямого считывания с разрешением 0,1 м².

4. Работает от сети переменного тока 115 В, 50 Гц.

5. Четырех проводной метод измерения во избежание сопротивления проводов.

На рисунке 2.7 показана схема измерения электропроводности.



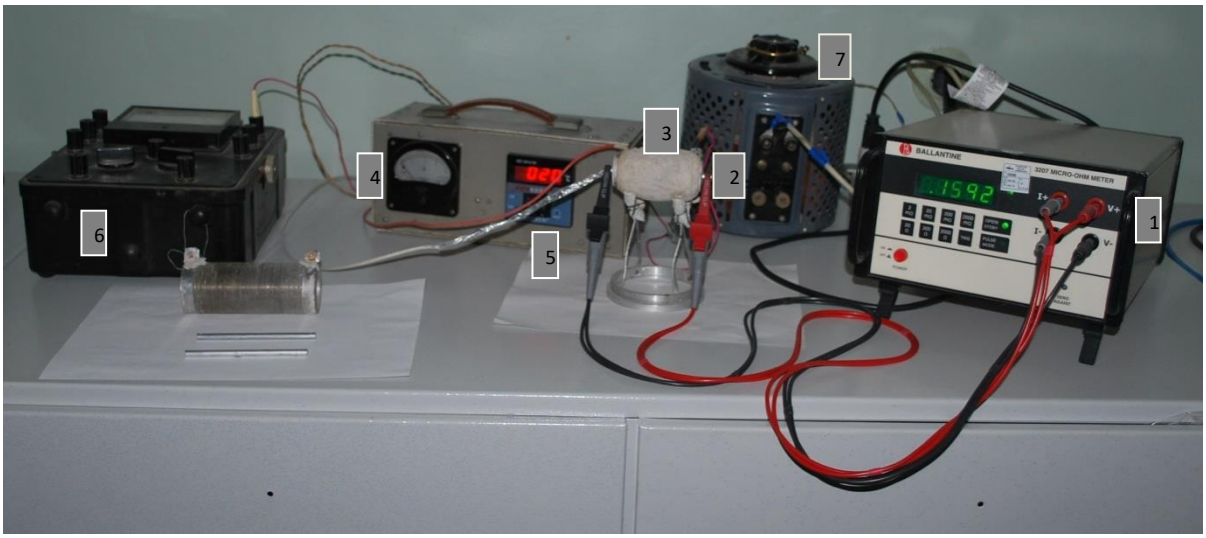
1-Микроомметр, 2-образец, 3-печь, 5- терморегулятор, 6-вольтметр, 7- ЛАТР

Рис. 2.7. Установка для измерения электропроводности образцов сплавов

На рисунках 2.8, 2.9 и 2.10 приведены общий вид микроомметра 3207, измеряемые образцы и установка для измерения электропроводности.

Рис. 2.8. Микроомметр типа 3207

Рис. 2.9. Измеряемые образцы, диаметр 3мм, длина 10 см



1 - Микроомметр, 2 - образец, 3 - печь, 5 - терморегулятор, 6 - вольтметр, 7 - ЛАТР

Рис. 2.10. Общий вид установки для измерения электропроводности

Величину электрического сопротивления образцов сплава САВ-1 измеряли четырехзондовым компенсационным методом при токе 1 мА [80; с.216]. Удельное электрическое сопротивление ρ определялось из соотношения:

$$\rho = \frac{U \cdot R_{эт} \cdot \mathrm{S}}{U_{эт} \cdot L}, \qquad (2.9)$$

где U и $U_{эт}$ - падение напряжения на измеряемом и эталонном образцах, $R_{эт}$ – сопротивление образцовой катушки, равное 0,01 Ом, S и L –поперечное сечение и длина образца, соответственно.

Зависимость электрического сопротивления образцов CAB-1 от температуры исследовали с помощью печи электросопротивления в диапазоне 290 – 490 K. Температура в печи изменялась со скоростью 2-5 K/мин и контролировалась хромель-алюмелевой термопарой. Измерения проводили в режиме нагревания и охлаждения через 25 K, с выдержкой 30 мин. в каждой точке измерения. Температура в измерительной камере поддерживалась регулятором температуры в пределах ±0,5 K.

ГЛАВА III. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ САВ-1 И АМГ-2

Научный интерес, проявляемый исследователями к теплопроводности алюминиевых сплавов и ее изменению под действием нейтронного облучения, вызван действием облучения на изменение структуры алюминиевых сплавов, что приводит к изменению их свойств: теплопроводности, электросопротивления, радиационной ползучести, распухания, характеристик упругости и ряда других свойств. Радиационная и коррозионная стойкости, структуры алюминиевого сплава САВ-1 изучены достаточно подробно в [21; с.274-277, 25; с.934-936, 30; с.108-115, 34; с.1-8]. Однако, действие облучения на теплопроводность данного сплава исследовалось очень мало.

Поэтому нами было изучено влияние нейтронного облучения на теплопроводность алюминиевого сплава САВ-1.

Результаты данной главы опубликованы в работах [93; р.334-339, 95-103].

§3.1. Коэффициент теплопроводности сплавов САВ-1 и АМГ-2

Зависимость относительного коэффициента теплопроводности от температуры в трех образцах алюминиевого сплава САВ-1 (размеры приведены в таблице 3.1) в диапазоне 290–490 K приведена на рисунке 3.1. Для сравнения показана также температурная зависимость теплопроводности в чистом алюминии [75; с.320]. В исследованном диапазоне температуры во всех трех образцах сплава САВ-1 изменение теплопроводности с температурой отличается от аналогичной зависимости для алюминия.

Таблица 3.1

Размеры образцов

№		Масса образца, г	Высота образца, мм	Диаметр образца, мм	λ_0, Вт / (м · К)
1	○	1,367	2,3	15	157
2	●	1,489	3,5	15	146
3	Δ	1,196	2,7	15	173

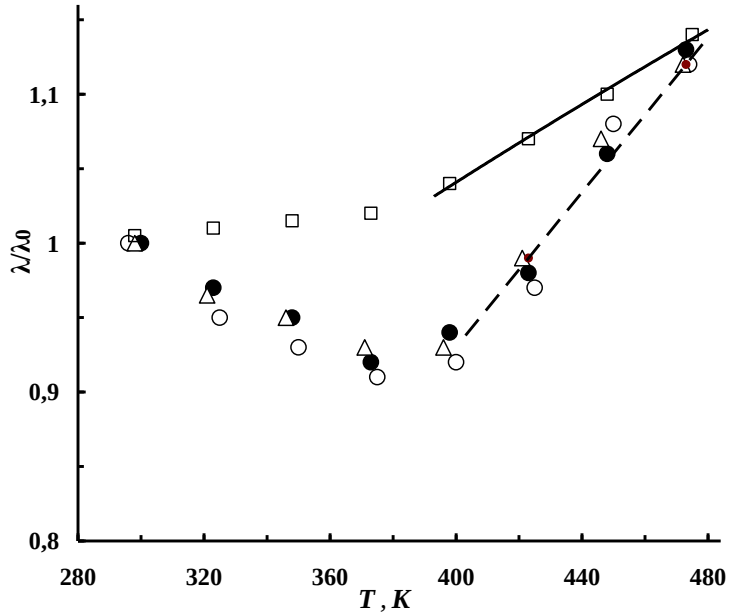


Рис. 3.1. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры необлученных образцов сплава САВ-1 (●, Δ, ○) и алюминия (□)

Штриховая и сплошная линии проведены в предположении линейной зависимости теплопроводности от температуры.

Для анализа экспериментальных данных необходимо знание температуры Дебая θ_D. Она является величиной, разделяющей область высокой температуры ($T>>\theta_D$), в которой колебания кристаллической решетки описываются классической теорией, и низкой температуры ($T<<\theta_D$), где становятся существенными квантово-механические эффекты. Температура Дебая определяется соотношением [81; с.151, 82; с.13-61]:

$$k\theta_D = \frac{h\omega_D}{2\pi} \qquad (3.1)$$

где k, h –постоянные Больцмана и Планка, соответственно; ω_D – максимальная частота колебаний кристаллической решетки, определяемая из условия равенства числа колебаний, приходящихся на частотный интервал от 0 до ω_D, полному числу колебательных степеней свободы решетки.

Температуру Дебая можно найти, используя скорость звуковых волн, по формуле [82; с.13-61]:

$$\theta_D = \frac{hu}{2\pi k}\left(6\pi^2 n\right)^{1/3}, \qquad (3.2)$$

где n – концентрация атомов в твердом теле; u – средняя дебаевская скорость звуковых волн, которая для поликристаллических материалов находится по соотношению:

$$u = \left[\frac{1}{3}\left(\frac{2}{u_S^3} + \frac{1}{u_L^3}\right)\right]^{-1/3}, \qquad (3.3)$$

где $u_S = \sqrt{\mu/\rho}$, $u_L = \sqrt{(K + 4\mu/3)/\rho}$ – средняя скорость продольных и поперечных звуковых волн, соответственно; μ – модуль сдвига и K – объемной упругости, соответственно; ρ – плотность.

При расчете использовали модули для номинально чистого алюминия [82; с.13-61], поскольку модули второго порядка почти не изменяются при малой концентрации примесей.

Концентрацию атомов n в исследованных образцах САВ-1 и АМГ-2 определяли по формуле:

$$n = \sum_i^4 \rho A_i / \mu_i \qquad (3.4)$$

где μ_i – молярная масса элемента, входящего в состав сплава с массовой долей A_i, (см. таблицу 3.1).

Расчетная температура Дебая для сплавов САВ-1 и АМГ-2 составляет 406 (±10) К и 408 (±10) К, что немного выше температуры Дебая для чистого

алюминия 394 К. На рисунке 3.1 видно, что отклонение температурной зависимости теплопроводности для образцов САВ-1 отличается от той же зависимости для алюминия.

Если в алюминии при температуре ниже температуры Дебая теплопроводность почти не зависит от температуры, то в сплаве САВ-1 она быстро уменьшается, достигая минимума в окрестности температуры Дебая. До температуры Дебая часть энергии уходит на возбуждение колебательного движения атомов в кристаллической решетке. При температуре выше температуры Дебая теплопроводность алюминия и сплава САВ-1 растет с температурой.

В металлах и сплавах возможны два основных механизма переноса тепла: упругие колебания решетки (фононы) и перенос свободными электронами. В соответствии с этим, теплопроводность можно условно разбить на решеточную $\lambda_р$ и электронную $\lambda_{эл}$.

При этом электронная теплопроводность, обусловленная рассеянием электронов на дефектах, примесях, фононах и электронах, является основным механизмом и подчиняется закону Видемана – Франца [81; с.151, 83; с.536].

$$\lambda = L\sigma T \tag{3.5}$$

где σ – удельная электропроводность; L – число Лоренца, которое для большинства металлов и полупроводников равно:

$$L = \left(r + \frac{5}{2}\right)\left(\frac{k}{e}\right)^2, \tag{3.6}$$

где r – показатель степени в зависимости времени релаксации от энергии, который определяется механизмом рассеяния и степенью вырождения электронов проводимости. В случае полного вырождения электронного газа и упругого рассеяния носителей равно [75; с.320]:

$$L = L_0 = (\frac{\pi^2}{3})(\frac{k}{e})^2 \cong 2{,}45 \cdot 10^{-8}\ Вт Ом К^{-2}$$

На основе данных о теплопроводности и электропроводности [19; с.148-152] вычисленное число Лоренца для сплавов САВ-1 и АМГ-2 при 298 К оказалось равным $1{,}87 \cdot 10^{-8}$ Вт·Ом·К$^{-2}$ и $1{,}85 \cdot 10^{-8}$ Вт ·Ом ·К$^{-2}$.

Такой результат, согласно формуле (3.6), свидетельствует о том, что показатель степени r=0, следовательно, имеет место только упругое рассеяние электронов на акустических колебаниях решетки [81; с.151].

Вклад фононной составляющей теплопроводности становится заметным, когда с ростом температуры возбуждаются сначала длинноволновые, затем, при приближении к температуре Дебая, и коротковолновые акустические и оптические фононы.

Одновременно уменьшается электронная составляющая теплопроводности за счет упругого взаимодействия электронов с длинноволновыми фононами [81; с.151]. В результате, при температуре, близкой к температуре θ_D, как ниже, так и выше ее, решеточная теплопроводность дает свой вклад.

При этом факторы, влияющие на фононную теплопроводность, могут определять характер зависимости общей теплопроводности от температуры.

На рисунке 3.2 показана температурная зависимость удельного теплового сопротивления сплава САВ-1, рассчитанная из усредненной теплопроводности, и такая же зависимость для алюминия. Видно, что в исследованном диапазоне температуры в сплаве САВ-1 наблюдается аномальное по сравнению с алюминием изменение удельного теплового сопротивления с максимумом в окрестности температуры Дебая, что может указывать на резонансный механизм такой зависимости.

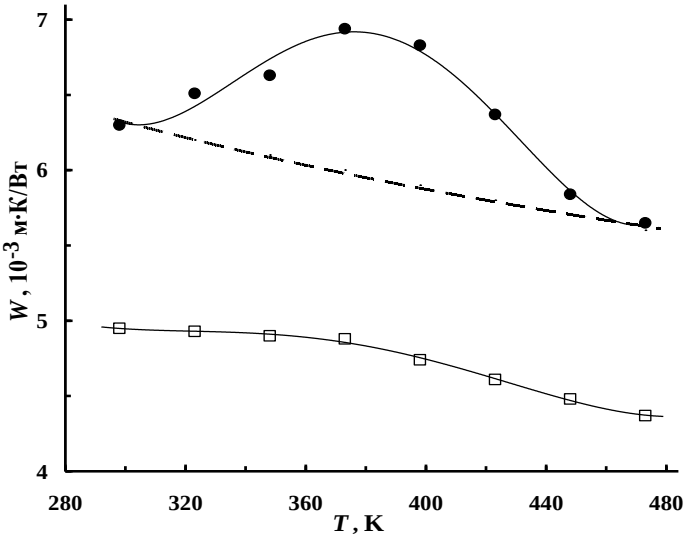


Рис. 3.2.Зависимость удельного теплового сопротивления сплава САВ-1 (●) и алюминия (□) от температуры. Штриховая линия проведена в предположении отсутствия резонансного рассеяния фононов

Согласно теории [81; с.151, 83; с.536], основными механизмами рассеяния фононов являются рассеяние фононов на фононах и на различных дефектах (примесные атомы, дислокации, границы зерен и различного рода объемные дефекты), препятствующих распространению потока тепла. Исходя из состава сплава САВ-1, наиболее вероятными включениями в нем, которые могут влиять на перенос тепла, являются фазы Mg_2Si и Si, плотность которых 1,94 и 2,33 г/см^3 отличается от плотности сплава САВ-1.

Согласно [25; с.934-936], основными источниками рассеяния в САВ-1 являются наноразмерные поры радиусом R_1 ~ 5–10 нм, как изолированные, так и в виде кластеров радиусом R_2 ~ 20–25 нм, R_3 ~ 40–50 нм.

При этом основная объемная доля приходится на изолированные фракции, и их концентрация достаточно значительна – до $2\cdot10^{16}$ см$^{-3}$. При увеличении температуры суммарная объемная доля фракций с малым радиусом может возрастать за счет фрагментации крупных кластеров.

Одновременно с ростом температуры на тепловое сопротивление влияют высокочастотные тепловые фононы. Длина волны наиболее интенсивных продольных акустических фононов, участвующих в переносе

тепла и определяющих решеточную фононную составляющую теплопроводности, находится в диапазоне 1–2 нм (соответствующие частоты (3–8)10^{12} Гц) [81; с.151]. При такой длине волны (меньше радиуса неоднородности r_0) наблюдается переходная область ($qr_0 \sim 1$), где сечение рассеяния может иметь резонансный выброс и значительно превосходить геометрическое сечение сферы рассеяния.

Резонансный эффект может привести к сильному (в несколько раз) увеличению решеточной составляющей теплового сопротивления и соответствующему подавлению фононной теплопроводности кристалла, что и наблюдается в экспериментах, как видно на рисунках 3.1, 3.2.

Дефектная структура сплава САВ-1 приводит к дополнительным видам рассеяния электронов и фононов, которые могут иметь различный характер в зависимости от частоты, температуры и концентрации дефектов [25; с.934-936]. В этом случае правило Маттиссена (аддитивность различных видов сопротивлений), строго говоря, не соблюдается и разделение отдельных составляющих теплового сопротивления, т.е. теплосопротивлений, обусловленных дефектами и межфононным взаимодействием, без знания температурного поведения электропроводности, не представляется возможным.

Из рисунка 3.2 видно, что в алюминии вклад фононной составляющей в теплопроводность мал, в сплаве САВ-1 температурные изменения теплопроводности обусловлены, в основном, фонон-фононными механизмами взаимодействия. В таком приближении, как видно на рисунке 3.2, доля решеточной теплопроводности в общей теплопроводности может составлять 20–30%.

Основными легирующими элементами сплавов являются кремний и магний. Доля остальных элементов составляла не более 0,6% по массе, за исключением железа в сплаве АМГ-2.

На рисунке 3.3 видно, что в исследованном диапазоне температурная зависимость теплопроводности в образцах сплавов САВ-1 и АМГ-2 имеет

одинаковый характер, проходя через минимум при температуре, близкой к характеристической температуре Дебая θ_D. При температуре выше θ_D теплопроводность сплавов начинает возрастать пропорционально температуре.

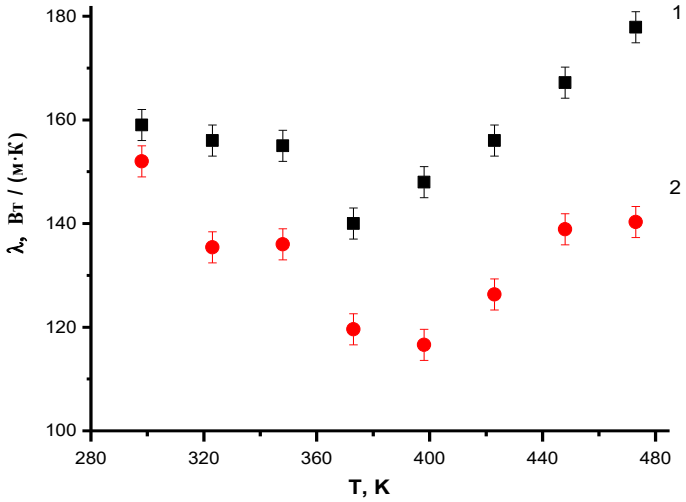


Рис. 3.3. Зависимость теплопроводности сплавов САВ-1 (о) и АМГ-2 (•) от температуры

Для анализа экспериментальных данных была рассчитана характеристическая температура Дебая θ_D, разделяющая области высокой температуры ($T>>\theta_D$), в которой колебания кристаллической решетки можно описывать классической теорией, и низкой ($T<<\theta_D$), где существенны квантово–механические эффекты, по формуле (3.2) [82; с.13-61]

Для сплавов САВ-1 и АМГ-2 она оказалась почти одинаковой – 406 и 408 К, соответственно. Из рисунка 3.3 видно, что характер температурной зависимости коэффициента теплопроводности меняется при температуре, близкой к температуре Дебая.

При проявлении нескольких механизмов рассеяния электронов число Лоренца может стать функцией, определяющей зависимость теплопроводности от того или иного фактора.

Для исследованных образцов САВ-1 была рассчитана электронная теплопроводность $\lambda_{эл}$ с использованием для числа Лоренца значения, соответствующего механизмам рассеяния с параметром r=-0,5 (рассеяние на акустических фононах и близко действующем потенциале примесей) [81; с.151]. Затем из экспериментальных данных для $\lambda(T)$ определена решеточная составляющая теплопроводности $\lambda_p(T)$.

Из рисунка 3.4 видно, что решеточная составляющая теплопроводности λ_p(T) имеет минимум в области температуры, близкой к температуре Дебая. Характер температурной зависимости электронной составляющей теплопроводности линейный.

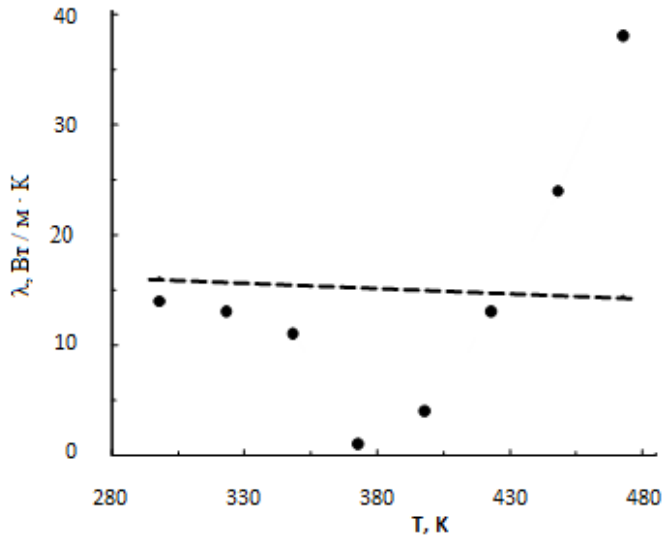


Рис. 3.4. Зависимость от температуры решеточной (●) и электронной (---) составляющей теплопроводности сплава САВ-1 (значения электронной составляющей на рисунке уменьшены в 10 раз)

Появление минимума на кривой решеточной теплопроводности указывает, вероятнее всего, на то, что число Лоренца при температурах ниже температуры Дебая, меньше значений, соответствующих его механизмам с r=-0,5. Такой эффект наблюдался в твердых растворах на основе PbTe и связывался с неупругим рассеянием при межэлектронных столкновениях [84; с.783-787].

Было показано, что повышение температуры и соответствующее увеличение рассеяния электронов на примесях уменьшают вклад механизма неупругого рассеяния. Вклад фононной составляющей теплопроводности становится заметным, когда с ростом температуры начинают возбуждаться сначала длинноволновые фононы, затем, при приближении к температуре Дебая, и коротковолновые акустические и оптические фононы. Одновременно монотонно уменьшается электронная составляющая теплопроводности за счет упругого взаимодействия электронов с длинноволновыми фононами. В результате при температуре выше температуры Дебая θ_D, решеточная теплопроводность растет с ростом температуры, но определяющей остается электронной теплопроводность.

§ 3.2. Теплопроводность алюминиевых сплавов, облученных быстрыми нейтронами в ядерном реакторе

Расчет теплопроводности образцов проведен по формуле (2.7), связывающей перепад температуры Δt в образце и тепломере, толщину h и сечение S пластин и др.

При проведении данного эксперимента установлено, что ход температурной зависимости теплопроводности $\lambda(T)$ исходных пластин имеет нелинейный характер. Видно, что сначала, по мере нагрева образцов от комнатной до T_1=398 К, теплопроводность несколько снижается, что соответствует известной формуле Дебая (3.9) [75; с.320, 76; с.287]:

$$\lambda = (\frac{1}{3})Cvl, \qquad (3.9)$$

где λ - теплопроводность, υ – скорость, l - длина свободного пробега электрона, С – теплоемкость.

Затем, когда Т>398 К, направление смещения меняется на противоположное, что прослеживается вплоть до 498 К. Отмеченную

температурную кинетику тепловой характеристики сплава иллюстрирует рисунок 3.5.

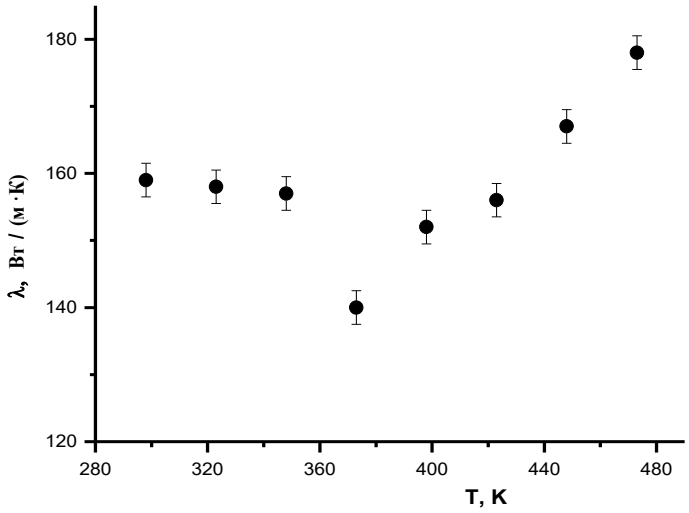


Рис. 3.5. Зависимость теплопроводности λ (Т) исходного образца CAB-1

В целом диапазон изменения теплопроводности составляет 160–177,5 Вт/(м·К), откуда следует вывод о довольно значительной величине температурного эффекта в данном материале.

В дальнейшем были подготовлены идентичные пластинки CAB–1, выбранные для проведения эксперимента с облучением дозами (10^{16} – 10^{20} н/см^2).

С целью изучения радиационного эффекта для сплава CAB-1 было прослежено влияние на него реакторного облучения малыми флюенсами быстрых нейтронов. Нами обнаружено, что увеличение коэффициента теплопроводности при облучении малыми дозами быстрых нейтронов обусловлено радиационным отжигом образца.

Повышение коэффициента теплопроводности образцов происходит при температуре 373 К, в необлученных образцах - при 423 К.

При использовании ядерного топлива температура оболочки не превышает 363 К, а при аварийном случае может превышать 399 К, поэтому исследован интервал 298 - 473 К.

Из полученных в процессе эксперимента результатов установлено существенное изменение хода температурной зависимости λ(T) в облученных образцах по отношению к таковой в исходных образцах. Например, для облученного образца при росте флюенса до 10^{16} н/см^2 обнаружено изменение соответствующих перепадов температур с ростом температуры по сравнению с исходным образцом и увеличение теплофизического параметра в выбранном диапазоне температур. Выявленная при этом терморадиационная кинетика теплового параметра отчетливо просматривается на рисунке 3.6.

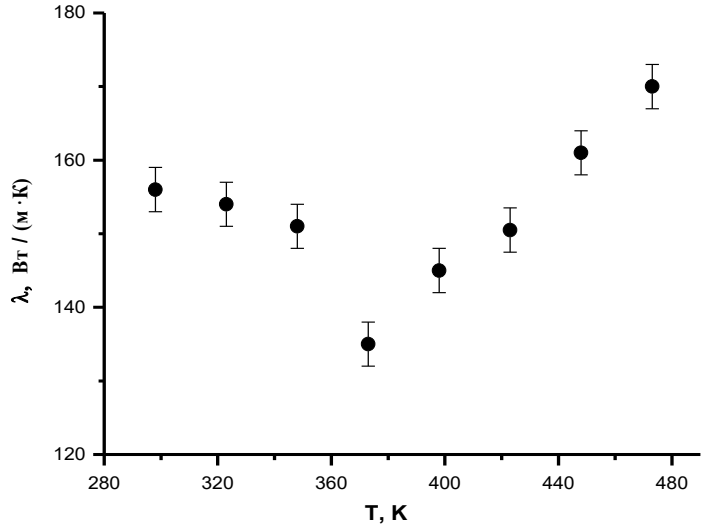


Рис. 3.6. Зависимость теплопроводности λ (T) образца САВ-1 при флюенсе 10^{16} н/см^2

Из рисунка видно, что, коэффициент теплопроводности образцов, начиная с комнатной температуры до температуры 398 К, уменьшается, после 398 К - увеличивается с ростом температуры.

Последующее пребывание образцов в каналах реактора до набора следующих доз (10^{17} – 10^{20} н/см^2) привело к дальнейшему преобразованию формы кривой. Результаты соответствующих измерений теплопроводности приведены на рисунках с 3.7 по 3.10.

Температурно-дозовые зависимости теплопроводности САВ-1 при этих

флюенсах иллюстрируют тот факт, что она при комнатной температуре продолжает постепенно снижаться, что прослеживается до 370 К.

Заметим, что на всех рисунках четко проявился минимум данной функции вблизи 370 К. Допускаем его связь с наличием, согласно классической теории Дебая, максимума на общей зависимости теплопроводности от температуры, поскольку электронная теплопроводность при низких температурах быстро растет с температурой, достигая максимума, а при более высоких температурах она уменьшается с ее ростом.

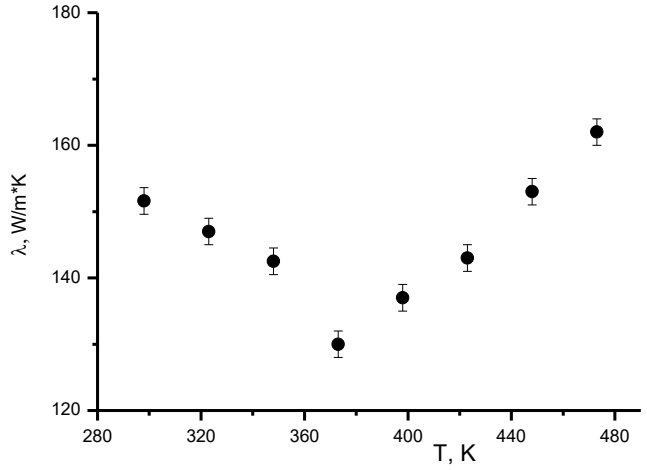


Рис. 3.7. Зависимость теплопроводности λ (Т) образца САВ-1 при флюенсе 10^{17}н/см^2

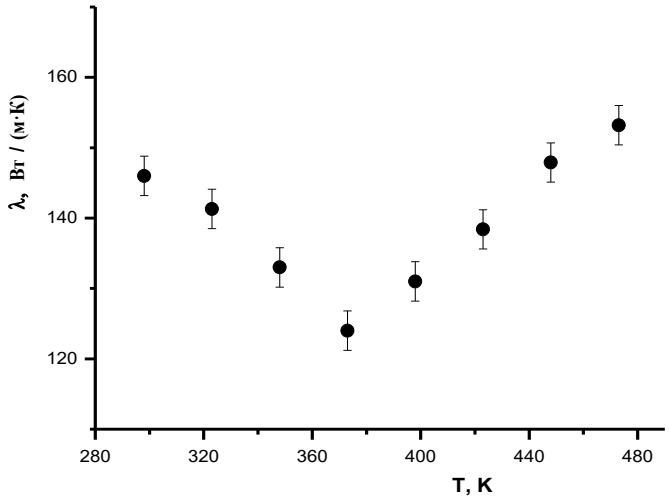


Рис. 3.8. Зависимость теплопроводности λ (Т) образца САВ-1 при флюенсе 10^{18} н/см^2

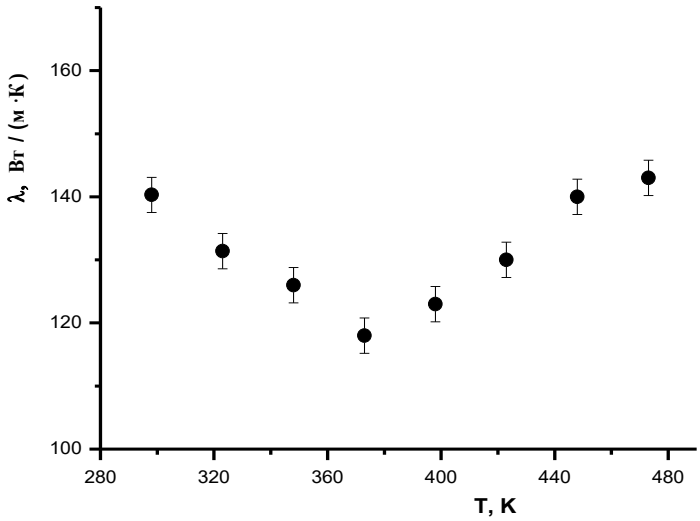


Рис. 3.9. Зависимость теплопроводности λ (Т) образца САВ-1 при флюенсе 10^{19} н/см^2

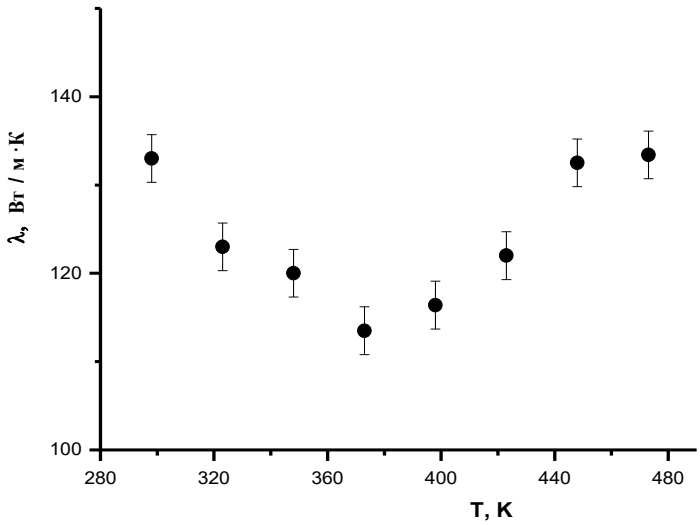


Рис. 3.10. Зависимость теплопроводности λ (Т) образца САВ-1 при флюенсе 10^{20} н/см^2

Результаты исследования температурной зависимости коэффициента теплопроводности в образцах алюминиевого сплава САВ-1 в диапазоне 298 – 490 К при различных дозах облучения приведены на рисунке 3.11.

Теплопроводность сплава также изменяется после облучения, уменьшаясь примерно на 10-12% с ростом дозы облучения.

Величины теплопроводности представлены относительно соответствующих величин теплопроводности при комнатной температуре λ_0. Значение температуры Дебая, равное 406 K, рассчитано из данных по упругим модулям и концентрации атомов в алюминиевом сплаве САВ-1 [19; с.148-152].

Из результатов, представленных на рисунке, можно видеть следующие особенности. Во-первых, с увеличением температуры до температур, близких к температуре Дебая, коэффициент теплопроводности уменьшается как для необлученных, так и облученных образцов сплава САВ-1. Во-вторых, и наиболее интересная, особенность заключается в том, что в образцах, подвергнутых облучению быстрыми нейтронами, наблюдается практически та же температурная зависимость коэффициента теплопроводности, что и для необлученных образцов САВ-1, а именно, проходит через минимум и затем увеличивается при температурах выше температуры Дебая.

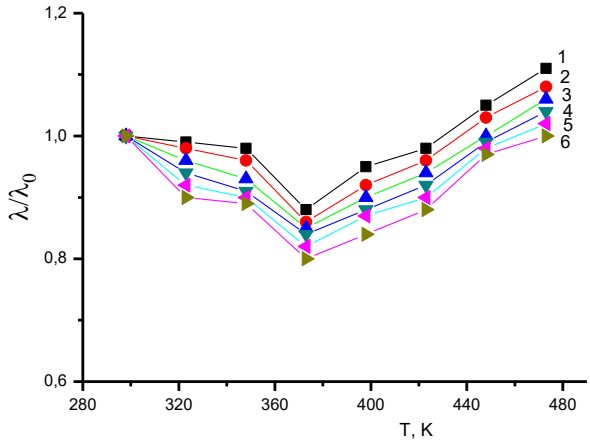
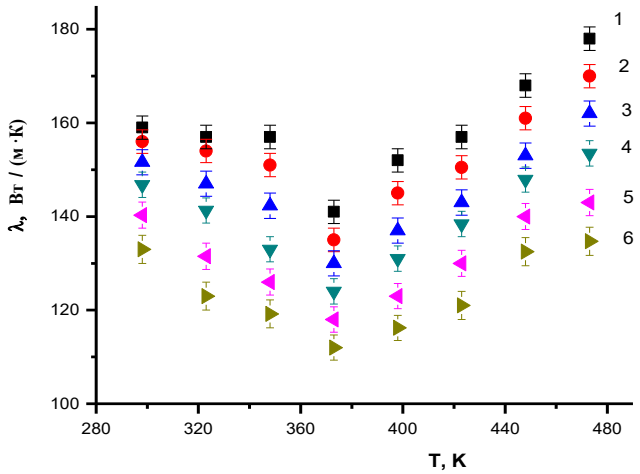


Рис. 3.11. Температурная зависимость теплопроводности образцов сплава САВ-1: необлученного (1), облученного дозами 10^{16} н/см^2 (2), 10^{17} н/см^2 (3), 10^{18} н/см^2 (4), 10^{19}н/см^2 (5), 10^{20} н/см^2 (6)

Исходя из имеющихся экспериментальных данных радиационного модифицирования теплофизических свойств исследуемого сплава, сделан

предварительный вывод о наличии при небольших температурах и флюенсах преимущественно основного дебаевского механизма переноса тепла [75; с.320, 76; с.287], приводящего, согласно формуле (3.9), к его резкому снижению. Когда происходит интенсивное рассеяние электронов ГЦК – решеткой, главным образом, электрон - электронным и электрон-фононным взаимодействием, высок и эффект влияния радиационных дефектов на электронную компоненту теплопроводности λ по сравнению с решеточной. Последующая термообработка пластин (T > 398 К) привела к дальнейшему преобразованию формы кривой и изменению изначальной закономерности λ(Т), когда действовал закон «1/Т», связанный с интенсивным ростом температуры в результате действия, по-видимому, фонон-фононного взаимодействия, приводящего к изменению соотношения электронной и решеточной составляющей теплопроводности обработанного в реакторе потоком быстрых нейтронов конструкционного материала.

На рисунке 3.12 приведены зависимости теплопроводности необлученного и облученных разными флюенсами быстрых нейтронов образцов САВ-1, в зависимости от температуры образца.



необлученный (1); облученный при флюенсах - 10^{16} н/см^2 (2), 10^{17} н/см^2 (3), 10^{18} н/см^2 (4), 10^{19} н/см^2 (5), 10^{20} н/см^2 (6)

Рис. 3.12. Зависимость λ(Т) образцов до и после облучении нейтронами флюенсом 10^{16} -10^{20} н/см^2

Теплопроводность измерена в единицах Вт/(м·К), ошибка измерения не превышает 10%. Как видно из рисунка 3.12, во всех образцах наблюдается рост теплопроводности выше температуры Дебая (как и положено термодинамикой). Из результатов исследования видно, что теплопроводность уменьшается с повышением температуры до ~ 370 К. Это температура близка к температуре кипения воды на поверхности ТВЭЛа (САВ-1) (~373 К) при работе реактора на номинальной мощности. При дальнейшем повышении температуры до 473 К в необлучённых и во всех облучённых (10^{16}–10^{20} н/см^2) образцах теплопроводность увеличивается относительно минимума около температуры Дебая.

На рисунке 3.13 показано изменение теплопроводности образцов в зависимости от флюенса быстрых нейтронов.

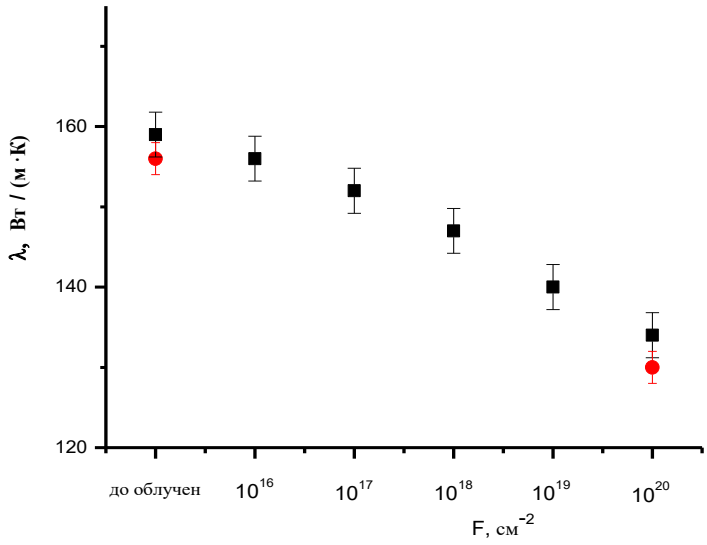


Рис. 3.13. Зависимость теплопроводности облученных образцов флюенсами быстрых нейтронов в интервале 10^{16} -10^{20} н/см^2

Из рисунка 3.13. видно, что наши результаты измерения теплопроводности образца САВ-1(137 В/(м·К)) при флюенсе 10^{20} н/см^2 совпадают в пределах ошибки измерения с полученными в Научно-исследовательском Институте атомных реакторов, Димитровград, Россия (133 В/(м·К)), [27; с.15].

Как видно из рисунка 3.13 при облучении образцов САВ-1 до флюенса 1020 н/см^2 теплопроводность уменьшается примерно на 20%. Этот факт был использован при расчетах активной зоны реактора ВВР-СМ ИЯФ АН РУз с использованием программы PLTEMP-ANL [85; с.273], разработанной в Аргоннской национальной лаборатории США. В работе [107; с.31-36] была выбрана оптимальная конфигурация активной зоны ядерного реактора, позволившая довести выгорание урана-235 до 65% в топливе типа ИРТ-4М, при этом в среднем получается флюенс 10^{20} н/см^2.

Таким образом, в исследованном интервале доз 10^{16} – 10^{20} н/см^2 выявлена общая закономерность изменения теплопроводности, которая заключается в том, что при облучении образцов наблюдается постепенное радиационно-индуцированное уменьшение теплопроводности по мере увеличения длительности пребывания сплава в канале ядерного реактора: температурные зависимости параллельно смещаются в сторону снижения основного теплового параметра.

В работе [76; с.287] показано, что при $T>>\theta_D$ решеточная теплопроводность различных материалов составила бы около l/3 электронной, если бы вклад в обе компоненты давало только электрон-фононное рассеяние. При высоких температурах это рассеяние действительно является важным, но в промежуточной области T решеточная теплопроводности λ может быть значительной, в то время как электронная приблизительно постоянна, что и сказывается на изменении реального соотношения обеих компонент теплопроводности, и такое обстоятельство было обнаружено в нашем эксперименте при облучении САВ-1 малыми флюенсами быстрых нейтронов.

Для подтверждения высказанных предположений использованы полученные в этом эксперименте зависимости $\lambda(T)$ при 300 К и данные работы [19; с.148-152], оценена длина свободного пробега (l) и число Лоренца (L). Результаты соответствующих параметров для различных флюенсов приведены в табл. 3.2. Оказалось, что первый параметр по мере

облучения образцов данным набором доз снижается, относительный радиационный эффект составляет довольно ощутимую величину: $\Delta I/I$ = 2,8-11,4%. На основании этого и формулы (3.9) сделан вывод, подтверждающий высказанный выше вывод об уменьшении теплопроводности λ облучённого сплава.

Таблица 3.2

Дозовые зависимости параметров l, L для САВ-1

№ образца	флюенс, н/см^2	l, м $\cdot 10^{-11}$	Δl/l, %	L, *Вт·Ом/ К^2*	ΔL,*Вт·Ом/ К^2*
1	0	3,52	-	$1.87 \cdot 10^{-8}$	$0,40 \cdot 10^{-8}$
2	10^{16}	3,42	2,8	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$-0,33 \cdot 10^{-8}$
3	10^{17}	3,32	5,7	$2,4 \cdot 10^{-8}$	$-0,22 \cdot 10^{-8}$
4	10^{18}	3,15	11,4	$2 \cdot 10^{-8}$	$-0,36 \cdot 10^{-8}$

Обычно, для определения решеточной теплопроводности λ допускается, что отклонение L от идеального числа L_0 происходит за счет решеточной составляющей. Соответствующие вычисления в данной работе показали, что отклонение ΔL составило величину $-0,33 \cdot 10^{-8}$, $-0,22 \cdot 10^{-8}$ (Вт·Ом/К^2) при 300 К и дозе облучения 10^{16}, 10^{17} н/см^2 . Исходя из этих результатов превышения числа Лоренца, нами был определен вклад решеточной компоненты при комнатной температуре в реакторно-облученном САВ-1 при флюенсе 10^{16} н/см$^{-2}$ и 10^{17} н/см^2 в общую теплопроводность. Соответствующие вычисления показали, что этот вклад довольно велик: в первом случае он составляет порядка 11,9%, во втором - 8,9% относительно электронной $\lambda_{эл}$.

Согласно теории твердого тела, вклад в теплопроводность металлов и металлических сплавов λ могут давать упругие колебания решетки и свободные электроны, что и обуславливает две составляющие части теплопроводности – решеточную λ_p и электронную $\lambda_{эл}$. При этом основным

механизмом передачи тепла является электронная теплопроводность $\lambda_{эл}$, и ее зависимость от температуры T подчиняется закону Видемана-Франца [81; с.151]:

$$\lambda_{эл} = L\sigma T \tag{3.10}$$

Наблюдаемая в эксперименте нелинейная зависимость теплопроводности от температуры в сплаве САВ-1 (рисунок 3.11) может быть обусловлена изменением решеточной составляющей теплопроводности, которая составляет до 30% от общей величины теплопроводности в этом сплаве [19; с.148-152].

В результате решеточная составляющая, заметно уменьшаясь, при температурах, близких к температуре θ_D, (как ниже, так и выше ее), будет определять температурное поведение общей теплопроводности [81; с.151].

В этой области температур возможно также изменение электронной составляющей теплопроводности за счет рассеяния на акустических фононах и неупругого рассеяния носителей при межэлектронных столкновениях [83; с.536]. Таким образом, рассмотренные механизмы могут приводить к наблюдаемым температурным зависимостям коэффициента теплопроводности в сплаве САВ-1 до и после облучения нейтронов.

Для исследованных образцов сплава САВ-1, подвергнутых разным дозам облучения при комнатной температуре, была рассчитана электронная теплопроводность $\lambda_{эл}$ с использованием данных работ [19; с.148-152] и значения числа Лоренца L, соответствующего параболическому закону дисперсии и параметру рассеяния носителей r, равному -0.5.

Такое значение параметра рассеяния, являющегося показателем степени в зависимости времени релаксации от энергии, соответствует акустическому фонону рассеяния носителей заряда [81; с.151].

Результаты расчета электронной составляющей теплопроводности $\lambda_{эл}$ представлены на рисунке 3.14, где также приведена экспериментально

наблюдаемая зависимость коэффициента теплопроводности от дозы нейтронного облучения.

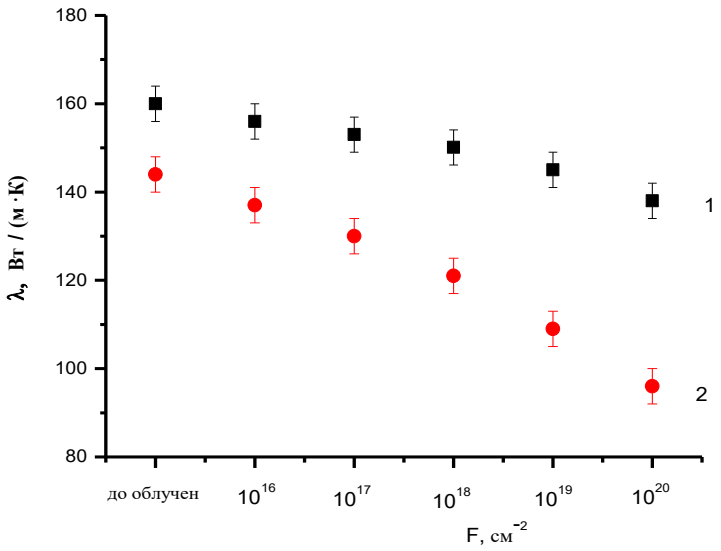


Рис. 3.14. Изменение коэффициента теплопроводности САВ-1 (1) и ее электронной составляющей (2 – расчетная кривая) в зависимости от флюенса нейтронов (*T* = 300 K)

Из представленных на рисунке 3.14 результатов видно, что с увеличением дозы быстрых нейтронов общая величина теплопроводности сплава САВ-1 монотонно уменьшается, в то время как электронная составляющая в ней уменьшается нелинейно, и после облучения флюенсом 10^{20} н/см^2 составляет только 70% от общей теплопроводности.

Наблюдаемые закономерности можно объяснить, уточнив расчетные значения безразмерного коэффициента Видемана - Франца A_λ, путем введения в рассмотрение неупругого рассеяния электронов, обусловленного столкновениями между носителями заряда [81; с.151, 83; с.536].

$$A_\lambda = \frac{L}{(k/e)^2} \qquad (3.11)$$

здесь *k*- коэффициент Больцмана и *e* - заряд электрона.

Как правило, в металлах неупругость рассеяния носителей незначительна. Однако влияние межэлектронных столкновений может оказаться существенным при высоких дозах облучения. В результате изменения состава и структуры сплава может происходить значительное отклонение коэффициента Видемана – Франца от величины $\pi^2/3$ [86; с. 493-496].

Расчет коэффициента Видемана – Франца A_λ в зависимости от флюенса нейтронов был проведен на основе формул (3.10) и (3.11), с использованием результатов по теплопроводности и электропроводности необлученных и облученных образцов сплавов САВ-1 и АМГ-2 при комнатной температуре [19; с.148-152], а также результатов расчета электронной составляющей теплопроводности $\lambda_{эл}$.

Рассчитанные зависимости приведены на рис 3.15.

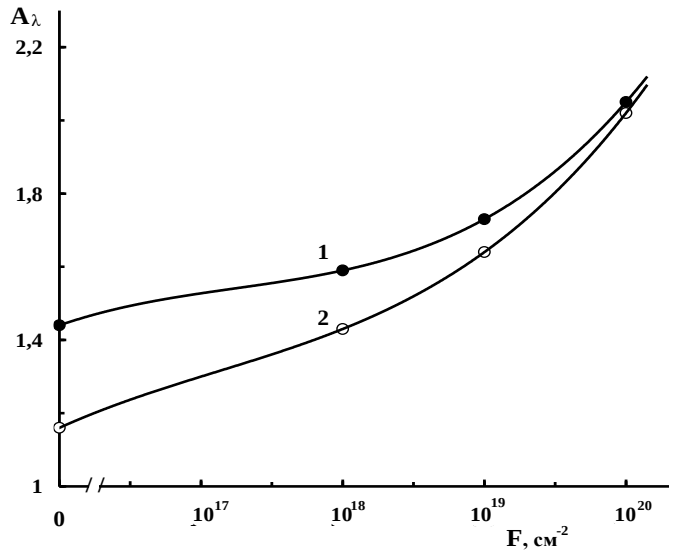


Рис. 3.15. Изменение коэффициента Видемана - Франца для экспериментально наблюдаемых значений теплопроводности (кривая 1) и электронной составляющей (кривая 2) в зависимости от флюенса нейтронов (1) (*T*=300 *K)*

Из представленных на рисунке 3.15 результатов видно, что с увеличением дозы облучения величина коэффициента Видемана-Франца,

соответствующего электронному механизму теплопроводности, практически полностью определяет теплопроводность сплавов САВ-1 и АМГ-2, в то время как вклад решеточной составляющей уменьшается и становится пренебрежимо малым.

В то же время коэффициент Видемана – Франца $A_{\lambda эл}$·в необлученных образцах и при малых дозах нейтронного облучения меньше значений, соответствующих экспериментально наблюдаемой теплопроводности. Причиной повышения $A_{\lambda эл}$ при больших дозах, видимо, является неупругое рассеяние электронов, эффективность которого повышается под действием облучения [84; с.783-787].

Согласно [83; с.536], в металлах в области температур, меньших температуры Дебая, при неупругом рассеянии носителей на акустических фононах коэффициент Видемана – Франца определяется приближенным выражением:

$$A_\lambda = \frac{\pi^2 T^2}{3 \cdot \theta^2} \qquad (3.12)$$

Полученные нами значения коэффициента Видемана–Франца A_λ удовлетворительно согласуются с рассчитанными значениями по формуле (3.12), которые для температур меньше температуры Дебая изменяются от 1,78 до 2,08. Такой результат косвенно подтверждает механизм неупругого рассеяния электронов на акустических фононах в образцах сплавов САВ-1 и АМГ-2, подвергнутых нейтронному облучению.

§3.3. Влияние примесей на теплопроводность алюминиевых сплавов САВ-1 и АМГ-2

Состав образцов необлученного сплавов САВ-1 и АМГ-2 измеренные коэффициенты теплопроводности λ_0 при комнатной температуре приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Элементный состав и коэффициенты теплопроводности образцов САВ- 1 и АМГ-2 при 298 К

образец	Масса образца, г	Высота образца, мм	Массовая доля элементов, %						λ_0, Вт / (м·К)
			Al	Si	Mg	Mn	Fe	Cu	
САВ-1	1,196	2,93	98,41	0,46	1,0	<0,01	0,14	<0,01	160
АМГ-2	1,24	3	96,7	0,21	2,34	<0,21	0,23	<0,01	153

Сплавы получены в лабораторных условиях [87; с.101-104]. С увеличением содержания кремния при комнатной температуре теплопроводность уменьшается (таблица 3.10). Исходными материалами для плавки были взяты чистый алюминий (99,98% Al) и сплав Al-Si с содержанием 12% Si с таким же уровнем чистоты. Анализ плотности производился двумя различными методами: гидростатическим взвешиванием и геометрическими измерениями. Анализ теплопроводности проводился на оборудовании для измерения теплопроводности лазерной вспышкой «NETZSCH LFA 457 MicroFlash» [87; с.101-104].

В таблице 3.4 приведены сведения о составах сплавов, полученных в лабораторных печах, и значениях теплопроводности, измеренных при комнатной температуре.

Таблица 3.4

Результаты измерения теплопроводности при комнатной температуре в сплавах алюминия

Сплав	0%Si	2%Si	4%Si	6%Si	8%Si	10%Si	12%Si
Вт/(м·К)	244,4	198,9	191,1	161,2	167,3	162,9	141,4

Кремний улучшает прочность алюминиевых сплавов, в основном, за счет увеличения жидкотекучести и, следовательно, плотности отливок, но при некоторой потере пластичности и сопротивления усталости, особенно при образовании соединений AlSiFe, $CuAl_2$, Mg_2Si, $FeSiAl_5$. [1; с. 412-426, 2;

с.304-326, 4; с.19-61]. В алюминиевых сплавах с магнием кремний дает некоторый непосредственный эффект упрочнения, поэтому отношение концентраций Mg:Si контролирует упрочнение при старении. При высокой температуре кремний снижает прочность и сопротивление ползучести, особенно в присутствии магния. Магний повышает прочность и твердость сплавов. Теплопроводность магния значительно меньше, чем у САВ-1 и АМГ-2 и равна 125 Вт/(м·К). При уменьшении концентрации магния в САВ-1 и АМГ-2 теплопроводность увеличивается [1; с. 412-426, 2; с.304-326, 4; с.19-61].

Результаты анализа элементного состава необлученного и облученных нейтронами образцов [35; с.105-109] приведены в таблице 3.5, в которой представлены также усредненные измеренные значения коэффициента теплопроводности при температуре 373 К, эта температура соответствует средней температуре оболочки тепловыделяющих сборок в активной зоне реактора.

Как видно из таблицы 3.5, элементный состав сплава САВ-1 при облучении нейтронами претерпевает изменения, которые зависят от дозы облучения.

Таблица 3.5

Элементный состав и коэффициент теплопроводности λ_0 необлученного и облученного нейтронами образцов САВ- 1 при Т=373 *К*

Флюенс, н/см^2	Элементный состав (%)						λ_0, Вт / (м · К)
	Al	Si	Mg	Mn	Fe	Cu	
-	98,27	0,5	1,06	0,01	0,14	0,02	148
10^{17}	97,77	1,1	0,82	0,01	0,28	0,02	140
10^{18}	97,32	1,75	0,62		0,30	0,01	138
10^{19}	97,09	2,05	0,53		0,32	0,01	133
10^{20}	96,86	2,35	0,45		0,33	0,01	122

Как видно из таблицы 3.5. при облучении быстрыми нейтронами происходит дефектообразование и поэтому коэффициент теплопроводности уменьшается с увеличением флюенса.

Наибольшие изменения в составе происходят при облучении флюенсом 10^{20}н/см^2: заметно увеличивается доля кремния (с 0,5% до 2,35%) и железа (с 0,14 до 0,33%), но уменьшается количество магния (в 2 раза) и алюминия [35; с. 105-109, 50; с.112-117]. Теплопроводность сплава также изменяется после облучения, уменьшаясь примерно на ~20% с ростом дозы облучения. Концентрация элементов определена в определённой точке, а при облучении локальные нерастворимые интерметаллические фазы в зоне Гинье-Престона дробятся и рассеиваются по объёму образца, и их распределение становится практически равномерным, поэтому в измеряемой точке меняется концентрация элементов.

При облучении небольшая часть алюминия в результате ядерных реакций ($^{27}Al(n,\gamma)^{28}Al\rightarrow^{28}Si$, $\beta=T_{1/2}=2,8$ мин.) переходит в кремний [21-24]. Процентные изменения концентрации элементов при облучении флюенсом 10^{20} н/см^2 составляют: алюминий 98,27 – 96,86%, кремний 0,5 - 2,35%, магний 1,06 – 0,45% и железо 0,14 – 0,33%. Изменение концентрации элементов влияет на теплопроводность сплава, так как для разных сплавов алюминия при комнатной температуре получены разные значения теплопроводности. При повышении концентрации элементов теплопроводность уменьшается, так как примесные атомы создают препятствие для теплопроводности. Например, у чистого алюминия теплопроводность 209 Вт/м·К, в сплаве САВ-1 теплопроводность 159 Вт/м·К, небольшие концентрации примеси дают разницу в теплопроводности около 24%.

§ 3.4. Выводы по главе

1. Определено, что в целом механизм теплопроводности сплава сложный и соответствует механизму Дебая и фононному. Выявлено, при температуре

выше температуры Дебая θ_D, решеточная теплопроводности сплавов САВ-1 и АМГ-2 растет с ростом температуры, но электронная теплопроводность определяет температурное поведение общей теплопроводности сплава САВ-1.

2. Проведено сравнительное исследование изменения теплофизических функций числа Лоренца L(Ф) и теплопроводности λ(Ф) в сплаве в зависимости от флюенса нейтронов, выявлена их корреляция.
3. Выявлено, что теплопроводность уменьшается с повышением температуры до 370 К. При дальнейшем повышении температуры до 473 К в необлучённых и во всех облучённых (с 10^{16} - 10^{20} н/см^2) образцах теплопроводность увеличивается.
4. Показано, что в сплавов САВ-1 и АМГ-2 за счет трансмутационного кремния возникают дополнительные фазы Mg_2Si в виде зон Гинье-Престона, когерентно связанных с матрицей. При этом структурное состояние сплава после длительного облучения изменяется за счет дробления интерметаллической фазы и насыщения сплава САВ-1 легирующими элементами и точечными дефектами.
5. При облучении образцов САВ-1 при температуре 373 К до флюенса 10^{20} н/см^2 теплопроводность уменьшается примерно на 20%. При этом, кризис теплообмена в самых энергонапряженных ТВС не возникает, а именно, температуры стенок ТВЭЛов и теплоносителя остаются ниже допустимых пределов. При номинальной мощности реактора 10 МВт, температура оболочки самых напряжённых ТВЭЛов не превышает 373 К.

ГЛАВА IV. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ САВ-1

Конструкционные материалы в ядерных реакторах эксплуатируются в сложных условиях совместного воздействия потоков быстрых нейтронов, температур, механического напряжения. Под действием этих факторов меняется структура материалов.

Одной из структурно чувствительных характеристик является электропроводность, величина которой может определять степень радиационного воздействия.

Поэтому требуется подробное исследование электропроводности алюминиевых сплавов в зависимости от флюенса быстрых нейтронов и температуры. В алюминиевом сплаве САВ-1 такие свойства мало исследованы.

Изменения электропроводности были исследованы нами, и результаты опубликованы в следующих работах [93; с.248–253, 104-106].

§ 4.1. Влияние концентрации элементов на электропроводность сплавов

Для алюминия удельная электропроводность составляет $3{,}6 \cdot 10^7$/(Ом·м).

В таблице 4.1 приведены результаты измерений удельной электропроводности сплава САВ-1 в зависимости от флюенса быстрых нейтронов.

Как видно из табл.4.1 при увеличении флюенса быстрых нейтронов удельная электропроводность сплава САВ-1 уменьшается за счет образования дополнительных дефектов в кристаллической решетке, несмотря на небольшое увеличение концентрации кремния.

При облучении нейтронами в кристаллической решетке образуются пары Френкеля, и они уменьшает электропроводность.

Таблица 4.1

Элементный состав и удельные электропроводности σ_0 необлученного и облученных нейтронами образцов САВ- 1 при Т=373 К

Флюенс, н/см^2	Элементный состав (%)						σ_0, 10^7 /(Ом·м)
	Al	Si	Mg	Mn	Fe	Cu	
-	98,27	0,5	1,06	0,01	0,14	0,02	2,71
10^{17}	97,77	1,1	0,82	0,01	0,28	0,02	2,56
10^{18}	97,32	1,75	0,62	-	0,30	0,01	2,44
10^{19}	97,09	2,05	0,53	-	0,32	0,01	2,31
10^{20}	96,86	2,35	0,45	-	0,33	0,01	2,12

За счет трансмутационного кремния образуется дополнительное количество фазы Mg_2Si в виде зон Гинье-Престона, когерентно связанных с матрицей. Фаза Mg_2Si распределяется равномерно по телу зерна, что положительно влияет на эксплуатационные характеристики сплава. Эта фаза связывает трансмутационный гелий, не давая ему возможности собираться в поры. После облучения от 10^{16} н/см^2 до 10^{20} н/см^2 локальные нерастворимые интерметаллические фазы как Al-Mg-Si-Fe в зоне Гинье-Престона раздробляются и рассеиваются по объёму образца, становясь практически равномерными, в результате уменьшается электропроводность [35; с. 105-109, 50; с.112-117].

§ 4.2. Электропроводность сплава САВ-1

В сплавах, под действием облучения развиваются различные радиационно-индуцированные структурные превращения, которые определяют изменения свойств материалов в процессе облучения и во многом определяют их радиационную повреждаемость. Эти процессы непосредственно связаны со свободной миграцией точечных дефектов, генерируемых облучением. При нейтронном облучении наряду со свободно

мигрирующими дефектами возникают также вакансионные кластеры. Диффузионная длина мигрирующих радиационных дефектов зависит от типа и концентрации стоков точечных дефектов, которыми могут служить дислокации, вакансионные кластеры, межфазные границы [88; с.352, 89; с.248].

В работе [19; с.148-152] были получены предварительные результаты по зависимости электропроводности от величины флюенса нейтронов и показано, что вводимые облучением дефекты кристаллической решетки создают в материале систему энергетических барьеров. Рассеяние носителей заряда на этих барьерах приводит к увеличению удельного электрического сопротивления. Исследованы закономерности воздействия нейтронного излучения на структуру и температурную зависимость удельного электросопротивления сплава САВ-1.

На рисунке 4.1 приведена температурная зависимость удельного электрического сопротивления для сплава САВ-1 и для сравнения приведена аналогичная зависимость для номинально чистого алюминия, построенная по данным работы [82; с.13-61].

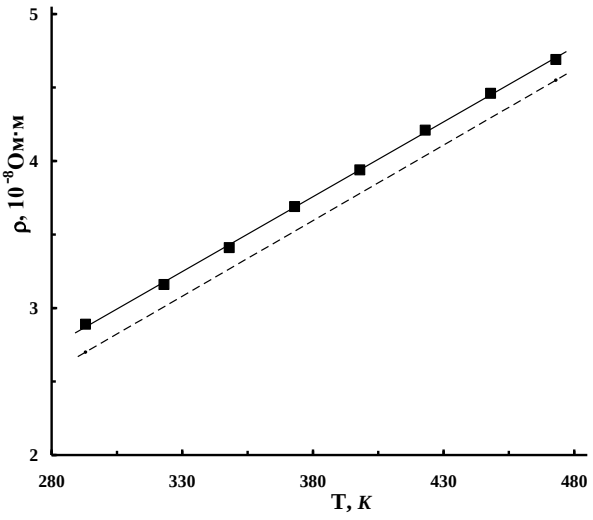


Рис. 4.1. Температурная зависимость удельного электрического сопротивления сплава САВ-1 (1) и чистого алюминия (2)

Видно, что в исследованном диапазоне наблюдается линейная зависимость, но имеется незначительное отличие как удельного сопротивления (~7%), так и температурного коэффициента сопротивления α ($\alpha_{сав\text{-}1}$=0,00346 $К^{-1}$, α_{Al}=0,00380 $К^{-1}$).

В металлических сплавах, как и в металлах, концентрация носителей не зависит от температуры. Поэтому температурная зависимость электропроводности сплавов должна определяться зависимостью подвижности носителей от температуры. В сплавах периодичность потенциала кристаллической решетки, нарушаемая тепловыми колебаниями, дополнительно нарушается беспорядочно распределенными атомами примесей. Это приводит к дополнительному рассеянию носителей заряда и уменьшению их подвижности [92; с.80].

В результате удельное сопротивление сплава, как правило, выше удельного сопротивления составляющих его компонентов. При температуре, отличной от абсолютного нуля, к остаточному сопротивлению $\rho_{ост}$ прибавляется тепловое сопротивление ρ_T, обусловленное рассеянием на тепловых колебаниях атомов решетки. Согласно известному правилу Маттиссена об аддитивности удельного сопротивления [82; с.13-61, 92; с.80], общее удельное сопротивление равно:

$$\rho = \rho_{ост} + \rho_T \tag{4.1}$$

Температурный коэффициент сопротивления α, как известно, выражает относительное изменение удельного сопротивления проводника ρ при его нагревании на 1 К. В первом приближении для материалов $\rho = \rho_T$, и для температурного коэффициента сопротивления чистых металлов можно написать [75; с.320, 93; p.334-339],

$$\alpha = \frac{1}{\rho_T}\frac{d\rho_T}{dT} \tag{4.2}$$

Для сплавов выражение (4.2) с учетом (4.1) можно преобразовать к виду,

$$\alpha_{спл} = \frac{1}{\rho_{ост} + \rho_T} \frac{d\rho_T}{dT} \tag{4.3}$$

Выражение (4.3) получено с учетом независимости остаточного сопротивления $\rho_{ост}$ от температуры. Видно, что температурный коэффициент сопротивления сплава должен быть меньше α чистого металла, причем тем меньше, чем больше $\rho_{ост}$ отличается от тепловой составляющей ρ_T. В результате после преобразований получаем соотношение:

$$a_{спл} = \frac{a}{(1 + \frac{\rho_{ост}}{\rho_T})} \tag{4.4}$$

Рассчитанный по формуле (4.4) с учетом данных для чистого алюминия [82; с.13-61] температурный коэффициент сопротивления для сплава САВ-1 равен 0,00354 $К^{-1}$, что хорошо согласуется с экспериментальным значением $\alpha_{спл}$=0,00346 $К^{-1}$.

§ 4.3. Электропроводность алюминиевых сплавов, облученных быстрыми нейтронами в ядерном реакторе

Результаты исследования зависимости удельного сопротивления сплава САВ-1 от температуры и дозы облучения приведены на рисунке 4.2

Из рисунка 4.2 видно, что в исследованном диапазоне флюенсов нейтронов удельное сопротивление сплава САВ-1 при всех температурах выше комнатной изменяется нелинейно. При комнатной температуре оно практически не изменяется с флюенсом (зависимость 1), увеличиваясь всего на 4%. Наибольшее изменение удельного сопротивления наблюдается при температуре 473 К (зависимость 5) и составляет 30%.

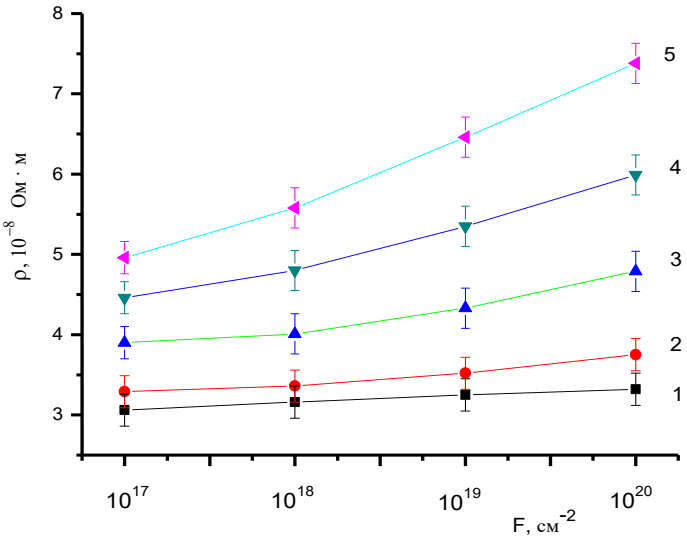


Рис. 4.2. Зависимость удельного сопротивления сплава САВ-1 от флюенса нейтронов при температурах 298 К (1), 323 К (2), 373 К (3), 423 К (4) и 473 К (5)

Электропроводность САВ-1 зависит от дозы облучения (флюенса). С увеличением флюенса нейтронов, аннигиляция междоузельных атомов и вакансий, образующихся в пиках смещения после прохождения быстрых нейтронов, замедляется. Нерастворимые интерметаллические фазы как Al-Mg-Si-Fe в зоне Гинье-Престона, раздробляются и рассеиваются по объёму образца, попадая в вакансионные кластеры, стабилизируют их, и препятствуют дальнейшей аннигиляции вакансии [27; с.15]. Чем больше флюенс нейтронов при облучении оболочечного материала САВ-1, тем больше образуются в кристаллической решетке пары Френкеля, вакансии и междоузельные атомы, и, соответственно, уменьшается электропроводность материала.

На рисунке 4.3 показано изменение электропроводности образцов в зависимости флюенса быстрых нейтронов.

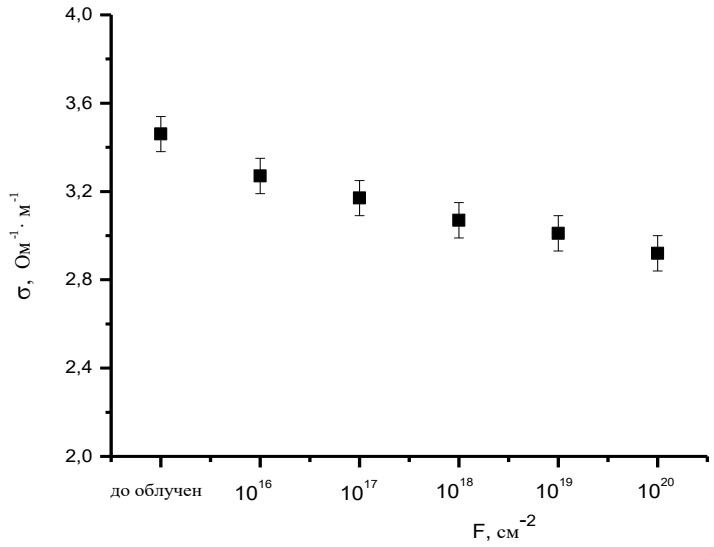


Рисунок 4.3. Зависимость электропроводности облученных разными флюенсами быстрых нейтронов флюенс 10^{16} -10^{20} н/см^2

Из рисунка 4.3. видно, что электропроводность уменьшается с повышением дозы облучения.

Измерения электропроводности проводились после облучения образцов в активной зоне реактора, при этом время выдержки после облучения зависело от спада активности образца. Есть разница между измерениями после облучения и измерениями в активной зоне реактора во время работы реактора на мощности 10 МВт. Известно, что радиационные нестабильные дефекты можно разделить на две группы – быстрые дефекты, которые аннигилируют в течение 0,1 с после облучения, и медленные дефекты, которые аннигилируют в течение 35-40 с [50; с.112-117]. После облучения нейтронами 30-40% дефектов аннигилируют, а оставшиеся дефекты дают свой вклад в изменение электропроводности.

Обнаруженное различие между параметрами кристаллической решетки сплава и чистого алюминия легко объясняется, если предположить, что сплав САВ-1 представляет собой твердый раствор внедрения, поскольку кремний и магний не образуют химических соединений с алюминием [88; с.352]. Соответственно, атомы основных легирующих элементов кремния и магния

увеличивают размер тех элементарных ячеек, в междоузлиях которых они располагаются.

Поскольку размер элементарной ячейки твердого раствора в разных участках решетки различен, то можно говорить лишь о среднем значении периода (его и измеряют при рентгенографическом исследовании). Определение периода решетки твердого сплава в сочетании с точным измерением плотности позволяет решить вопрос о том, как построен этот сплав. Для этого необходимо определить среднее число атомов *Z*, приходящееся на элементарную ячейку кристаллической решетки.

Была рассчитана концентрация атомов n в чистом алюминии и в исследованном сплаве САВ-1:

$$n = N_A \cdot \rho \sum_{1}^{m} \frac{A_i}{\mu_i}, \qquad (4.5)$$

где N_A – число Авогадро, ρ - плотность сплава, μ_i – молярная масса соответствующего элемента, входящего в состав сплава с массовой долей A_i. В результате получено, что концентрация атомов n в сплаве и в чистом алюминии равна $6{,}41 \cdot 10^{22}$ см$^{-3}$ и $6{,}02 \cdot 10^{22}$ см$^{-3}$, соответственно.

Анализ показал также, что при комнатной температуре сплав САВ-1 и АМГ-2, как и чистый алюминий, имеет гранецентрированную кубическую структуру со средним параметром решетки, $a_{спл}$=4,066Å и $a_{спл}$=4,073Å, который на 0,6% больше параметра решетки эталонного образца алюминия (4,0414Å).

Используя среднее значение параметра решетки сплава САВ-1 $a_{спл}$=4,066Å и АМГ-2 $a_{спл}$=4,073Å, полученное из рентгенографического анализа, легко вычислить среднее число атомов *Z*, приходящееся на элементарную ячейку кристаллической решетки этого сплава:

$$Z = n \cdot a_{спл}^{3} \qquad (4.6)$$

Результаты расчета по формуле (4.6) показали, что это число в сплаве САВ-1 и АМГ-2 $Z>4$, то есть больше нормального числа атомов в ячейке гранецентрированной кристаллической решетки. Отсюда следует однозначный вывод, что сплавов САВ-1 и АМГ-2, в основном, построен по типу твердого раствора внедрения.

Известно, что в твердых растворах внедрения атомы растворенных элементов располагаются в межатомных промежутках кристаллической решетки и приводят к местным искажениям структуры основы сплава [88; с.352]. Эти искажения относительно велики из-за малых размеров пор, в которых размещаются примесные атомы. Поэтому увеличение объема искаженных ячеек, несмотря на их относительно малую долю, приводит к заметному увеличению среднего периода решетки сплава, и соответствующему возрастанию объема элементарной ячейки при образовании раствора внедрения, что и наблюдается на опыте. Как следствие, конкретная конфигурация кристаллической решетки сплава характеризуется случайным распределением примесных атомов в междоузлиях кристаллической решетки. Такой раствор внедрения можно рассматривать как трехкомпонентную систему из атомов основного элемента – растворителя, внедренных атомов и пустых пор [26; с.160-164, 90; с.43-47].

В соответствии с упругой моделью твердого тела [91; с.501], степень искажения структуры твердого тела определяется величиной среднего квадратичного статического смещения атомов из положений равновесия:

$$u_{cm}^2 = \gamma \cdot N \cdot \Delta R^2, \qquad (4.7)$$

где γ - числовой множитель, равный 7,8 для кубической гранецентрированной решетки, ΔR – разность атомных радиусов, N – относительная концентрация атомов примеси.

Принимая, что основной вклад в искажение кристаллической решетки сплава САВ-1 и АМГ-2 дают атомы кремния (атомные радиусы брались из [84; с.352]), получаем среднее статическое смещение, равное 0,04 нм, которое по порядку величины сравнимо с динамическими смещениями атомов из положений равновесия, вызываемыми тепловым движением в кристалле [88; с.352].

Такой результат свидетельствует о том, что в сплавах периодичность потенциала кристаллической решетки нарушается, наряду с тепловыми колебаниями атомов, хаотично распределенными атомами легирующих элементов, происходит дополнительное рассеяние носителей заряда и уменьшение их подвижности. В итоге величина удельного сопротивления сплава, как правило, выше удельного сопротивления металла, составляющего его основу, поскольку к сопротивлению ρ_T, обусловленному рассеянием на тепловых колебаниях решетки, добавляется сопротивление $\rho_{ост}$, вызванное структурными дефектами.

После простых преобразований из (4.3) получается соотношение, позволяющее определить $\rho_{ост}$ для сплава САВ-1:

$$\rho_{ост} = \rho_T \frac{\alpha - \alpha_{спл}}{\alpha_{спл}} \qquad (4.5)$$

Расчет по формулам (4.1), (4.4) с использованием литературных данных α=0,0038 K^{-1} и ρ_T=2,7. 10^{-8} Ом·м для чистого алюминия и величины $\alpha_{спл}$=0,0035 K^{-1} для САВ-1, определенного экспериментально, дал значение $\rho_{спл}$=2,93. 10^{-8} Ом·м, которое хорошо согласуется с литературным значением $\rho_{спл}$=2,88. 10^{-8} Ом·м для необлученного сплава САВ-1 в исследованном диапазоне температур.

§ 4.4. Выводы по главе

1. Определено, что в исследованном диапазоне температур наблюдается линейная зависимость электрического сопротивления САВ-1, но имеется незначительное отличие как удельного сопротивления (~7%), так и температурного коэффициента сопротивления α ($\alpha_{сав\text{-}1}$=0,00346, α_{Al}=0,00380) чистого алюминия.
2. Установлено, что в исследованном диапазоне температур электрическое сопротивление сплава САВ-1 возрастает с температурой линейно в необлученном образце (зависимость 1) и нелинейно в образцах, получивших различные дозы нейтронного облучения. При этом с ростом флюенса нейтронов отклонение от линейной зависимости и, соответственно, скорость роста сопротивления с температурой заметно увеличиваются. Так, при флюенсе 10^{20} н/см^2 удельное сопротивление САВ-1 удваивается при изменении температуры от 298 до 473 К.
3. Учитывая тот факт, что основной вклад в искажение кристаллической решетки сплава САВ-1 и АМГ-2 дают атомы кремния, получено среднее статическое смещение, равное 0,04 нм, которое по порядку величины сравнимо с динамическими смещениями атомов из положений равновесия, вызываемыми тепловым движением в кристалле.
4. Рассчитано остаточное сопротивление $\rho_{ост}$ и определено экспериментально значение $\rho_{спл}$=2,93. 10^{-8} Ом·м, которое хорошо согласуется с литературным значением $\rho_{спл}$=2,88. 10^{-8} Ом·м для необлученного сплава САВ-1.
5. Полученные экспериментальные результаты позволяют определить теплопроводность сплавов при работе реакторов на номинальной мощности.
6. Определена зависимость электропроводности и числа Лоренца как от флюенса нейтронов. Результаты позволяют определить теплопроводность материала из результатов измерений электропроводности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов исследования, проведенного по теме диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам «Влияние нейтронного облучения на тепло- и электрофизические свойства конструкционных материалов ядерного реактора», сделаны следующие выводы:

1. Обнаружено радиационно-индуцированное уменьшение теплопроводности конструкционного сплава САВ-1 на 20% в диапазоне флюенса нейтронов 10^{16} - 10^{20} н/см^2, обусловленное дроблением интерметаллической фазы и насыщением сплава САВ-1 легирующими элементами;
2. Выявлено, при температуре выше температуры Дебая θ_D, решеточная теплопроводности сплавов САВ-1 и АМГ-2 растет с ростом температуры, но определяющей остается электронной теплопроводность.
3. Показано, что в сплавах САВ-1 и АМГ-2 за счет трансмутационного кремния возникают дополнительные фазы Mg_2Si в виде зон Гинье-Престона, когерентно связанных с матрицей. При этом структурное состояние сплава после длительного облучения изменяется за счет дробления интерметаллической фазы и насыщения сплавов легирующими элементами и точечными дефектами.
4. Установлено, что при облучении сплавов САВ-1 и АМГ-2 нейтронами до дозы 10^{20} н/см^2 коэффициент Видемана - Франца увеличивается в 1.5 раза. Повышение этого коэффициента может быть связано с неупругим рассеянием электронов на акустических фононах в образцах сплава, подвергнутых большим дозам нейтронного облучения.
5. Выявлено, что характер роста электрического сопротивления в облученном нейтронами конструкционном сплаве САВ-1 в диапазоне температур от 290 до 500 K вызван дополнительным рассеянием носителей заряда на образованных дефектах в кристаллической решетке.

При этом с ростом флюенса нейтронов до 10^{20} н/см^2 отклонение от линейной зависимости и, соответственно, скорость роста сопротивления с температурой увеличиваются.

6. Определены температуры Дебая для сплавов САВ-1 и АМГ-2, которые оказались равными 406 К и 408 К соответственно, то есть близкими к температуре Дебая чистого алюминия (394 К).
7. Проведено сравнительное исследование изменения числа Лоренца, теплопроводности и электропроводности в сплаве в зависимости от флюенса нейтронов, выявлена их корреляция. Результаты позволяют определить теплопроводность материала из результатов измерений электропроводности.
8. Учитывая тот факт, что вклад в искажение кристаллической решетки сплава САВ-1 и АМГ-2 дают атомы кремния, получено среднее статическое смещение, равное 0,04 нм, которое по порядку величины сравнимо с динамическими смещениями атомов из положений равновесия, вызываемыми тепловым движением в кристалле.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов // М., Металлургия, 1979. – 640 С.

2. Арчакова З.Н., Балаховцев Г.А., Басова И.Г. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. М., Металлургия, 1984. – 408 С.

3. Хэтч Дж.Е. Алюминий: свойства и физическое металловедение // Пер. с англ./ Под ред. Дж.Е.Хэтча. - М.: Металлургия, 1989. – 422 С.

4. Шеметов Г.Ф. Алюминиевые сплавы: составы, свойства, применения. - Санкт-Петербург, 2012. – 155 с.

5. Калина Б.А. Физическое материаловедение. – Т.6. ч. I. Конструкционные материалы ядерной техники. - Москва, 2008. – 672 с.

6. Klemens P.G., WilliamsR.K. Thermal conductivity of metals and alloys // International metals reviews. – 1986. – Vol. 31, No. 5. – P. 197–215.

7. Muna K. Abbass, Khairia S. Hassan et al. Study of Corrosion Resistance of Aluminum Alloy 6061/SiC Composites in 3.5% NaCl Solution // International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing. - 2015. – Vol. 3, No. 1. – pp. 31-35.

8. Васильев А.А., Кузьмин Н.Л., Груздев А.С. Исследование кинетики образования метастабильных фаз в закаленных сплавах Al-Mg-Si // Физика твердого тела. – Санкт-Петербург, 2011. – Т 53, вып. 8. – С. 1576-1581.

9. Мавлютов А.М., Касаткин И.А., Мурашкин М.Ю. и др. Влияние микроструктуры на физико-механические свойства алюминиевого сплава системы Al−Mg−Si, наноструктурированного интенсивной пластической деформацией // Физика твердого тела. – Санкт-Петербург, 2015. - том 57, вып. 10. – С. 1998-2004.

10. Valiev R.Z., Murashkin M.Yu., Sabirov I. A nanostructural design to produce high-strength Al alloy with enhanced electrical conductivity // Scripta Materialia. – Elsevier, 2014. –Vol. 76. – pp. 13-16 .

11. Bobruk E.V., Murashkin M.Yu., Kazykhanov V.U., Valiev R.Z. Aging behavior and properties of ultrafine-grained aluminum alloys of Al-Mg-Si system // Reviews on Advanced Materials Science. - St. Petersburg, 2012.- vol.31. – pp.109-115.

12. Murashkin M.Yu., Sabirov I., Kazykhanov V.U., Bobruk E.V., Dubravina A.A., Valiev R.Z. Enhanced mechanical properties and electrical conductivity in ultrafine-grained Al alloy processed via ECAP-PC // Journal of Materials Science. – 2013. – Vol. 48. – pp. 4501- 4509.

13. Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И. Материаловедение. - Санкт-Петербург, 2007. –784с.

14. Амаев А.Д., Крюков А.М., Неклюдов И.М. и др. Радиационная повреждаемость и работоспособность конструкционных материалов. - С.-Пб.: «Политехника», 1997. – 312 с.

15. Паршин А.М., Неклюдов И.М., Камышанченко И.В. и др. Физика радиационных явлений и радиационное материаловедение. - Белгород: Изд. Белгородского университета, 1998. – 378с.

16. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. Пер. с англ. М.: Наука, 1978. – 792 с.

17. Блат Ф. Физика электронной проводимости в твердых телах. - М.: Мир, 1971. - 470 с.

18. Козлов А.В. Действие нейтронного облучения на металлы при различных температурах и возможность самоорганизации протекающих при этом процессов // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – Москва, 2006. Т. 37, вып 4. –С. 1110-1150.

19. Байтелесов С.А., Салихбаев У.С., Сандалов В.Н., Кунгуров Ф.Р., Халиков У.А. Электропроводность алюминиевых сплавов, облученных нейтронами. – Атомная Энергия. – Москва, 2010. – Том 109, вып. 3. – С. 148-152.

20. Salikhbaev U.S., Baytelesov S.A., Dosimboev A.A. e.a. About some characteristics of WWW-SM reactor at work with the low enriched nuclear fuel // Nucl. Rad. Phys. – 2006. - v.1. N2. –pp.119-127.

21. Коноплев К. А., Фридман С. Р., Орлов С. П., Илатовский В. А., Морозов А. М., Петров В. А., Петелин А. Л., Ижутов А. Л., Исследование радиационной стойкости сплава САВ-1, облученного до флюенса ~3,510^{22} см$^{-2}$(E>0,8МэВ) // Атомная Энергия.- Москва, 2015. – Том 118, вып. 5. – С. 274-277.

22. Konoplev K.A., Orlov S.P., Friedman S.R. Examination of SAV-1 alloy radiation stability at the Petersburg Nuclear Physics Institute // Uzbek journal of physics. – Tashkent, 2010. – vol. 12, №4-6. - pp. – 342-347.

23. Воеводин В.Н., Неклюдов И.М. Проблемы радиационной стойкости конструкционных материалов ядерной энергетики // Вестник Харьковского Университета. – Харьков, 2006. - вып.4, № 746.– С .3-20.

24. Илатовский В.А., Коноплев К.А., Орлов С.П. и др. Реакторные испытания и после реакторные исследования сплава САВ-1.- Препринт ПИЯФ 2962. – С.Петербург, 2014. – 22 с.

25. Лебедев В.М., Лебедев В.Т., Иванова И.Н., Орлов С.П., Орлова Д.Н. Структура алюминиевых сплавов, облученных нейтронами реактора // Физика твердого тела. – С.Петербург, 2010. - Том 52, вып. 5. – С. 934-936.

26. Лебедев В.М., Лебедев В.Т., Орлов С.П. и др. Исследование наноразмерной структуры сплава САВ-1, облученного быстрыми нейтронами до высоких флюенсов, методом малоуглового рассеяния нейтронов. – ФТТ. - С.Петербург, 2014. - Т. 56, вып. 1. –С. 160-164.

27. Вотинов С.Н., Шаров Б.В., Ярковой С.В. и др. Ускорение структурных изменений в алюминиевом сплаве под действием реакторного облучения. - Дмитровград: Мелекесс, 1970. –С. 15.

28. Абдукадырова И.Х., Байтелесов С.А. Температурная и дозовая зависимость теплофизических свойств некоторых конструкционных алюминиевых сплавов // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – Саров (Россия), 2011. - №1 (93). – С. 89-95.

29. Абдукадырова И.Х., Байтелесов С.А. О радиационном эффекте теплопроводности облученных в ядерном реакторе конструкционных

сплавов типа АМГ-2 // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология. - Саров (Россия), 2011. -№4 (96).- С. 57-62.

30. Максимкин О.П., Яровчук А.В., Трубарова Л.Г и др. Влияние нейтронного облучения на межкристаллитную коррозию и коррозионное растрескивание низколегированного алюминиевого сплава САВ-1 // Вопросы атомной науки и техники. – Харьков, 2011. - №2. – С. 108-115.

31. Кутько О.А. Влияние нейтронного облучения и термической обработки на коррозионное поведение низколегированного алюминиевого сплава САВ-1 // Конкурс НИОКР Молодых ученых и Специалистов НЯЦ РК. – Курчатов, 2006. – С. 17.

32. Kanjana K., Ampornrat P. and Channuie J. Gamma-radiation-induced corrosion of aluminum alloy: low dose effect // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 860. - 2017. – id.012041. – pp. 1-7.

33. Максимкин О.П., Яровчук А.В., Аулова Д.С. и др. Коррозийная 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.

34. Максимкин О.П., Цай К.В., Рофман О.В., Сильнягина Н.С. Влияние нейтронного облучения и пострадиационного отжига на микроструктуру и свойства сплава Al–Mg–Si // Физика металлов и металловедение. – Екатеринбург, 2016. – Т. 117, № 9. – С. 1–8.

35. Салихбаев У.С., Байтелесов С.А., Хидиров И.Г., Кунгуров Ф.Р. и др. Влияние реакторного облучения на микроструктуру и микротвердость алюминиевых сплавов САВ-1 и АМГ-2 // Альтернативная энергетика и экология.- Саров (Россия), 2008. - № 9 (65). – С. 105-109.

36. Salikhbaev U.S., Baytelesov S.A., Kungurov F.R., Saidov A.S. Studying of Influence of neutron irradiation on element contents and structures of aluminum alloys SAV-1 and AMG-2 // IAEA-TECDOC-1659, Research Reactor Application for Materials under High Neutron Influence.-Vienna, Austria, 2011. – P.155-163.

37. Абдукадырова И.Х., Таджибаев Д.П. Влияние реакторного излучения на микротвердость авиалей типа САВ-1 // Проблемы прочности. – Киев (Украина), 2011. - № 1. – С. 153–158.
38. Вотинов С.Н., Максимкин О.П. К вопросу о роли энергии дефекта упаковки в изменении структуры и свойств металлов и сплавов в результате радиационного и термического воздействия // Вопросы атомной науки и техники. – Саров (Россия), 2002. - №3, – С. 23-30.
39. Ахмеджанов Ф.Р., Болтабаев А.Ф., Курталиев Э.Н., Эшниязов О.И. Определение упругих констант конструкционных материалов ядерных реакторов // Вестник НЯЦ РК. – Алматы (Казахстан), 2016. - вып. 1(65). – С. 39-41.
40. Mavlyutov A.M., Orlova T.S., Latynina T.A. et al. Influence of additional deformation on microstructure, mechanical and electrical properties of AL-Mg-SI alloy processed by high pressure torsion // Reviews on Advanced Materials Science. - 2017. - V.52. – P. 61-69.
41. Орлов А.В., Кривобоков В.П., Орлов В.Л. Интегральный эффект радиационного распухания // Вестник Югорского государственного университета. – Россия, 2009. - вып.2. – С. 71-76.
42. Kamikawa N., Huang X., Tsuji N., Hansen N. Strengthening mechanisms in nanostructured high-purity aluminium deformed to high strain and annealed // Acta Materiala. – Elsevier, 2009. - V. 57. – pp. 4198-4208.
43. Murashkin M.Yu., Bobruk E.V., Kil'mametov A.R., Valiev R.Z. Structure and Mechanical Properties of Aluminum Alloy 6061 Subjected to Equal-Channel Angular Pressing in Parallel Channels // The Physics of Metals and Metallography. - New York (USA), 2009. - V. 108, No. 4. – pp. 415–423.
44. Emanuela Cerri, Paola Leo. Influence of severe plastic deformation on aging of Al–Mg–Si alloys // Materials Science and Engineering. – Elsevier, 2005. - A 410–411. – pp. 226–229.

45. Murayama M., Hono K., Saga M. Atom probe studies on the early stages of precipitation in Al–Mg–Si alloys // Materials Science and Engineering A. - 1998. – vol.250. – pp. 127–132.

46. Corrosion of Research Reactor aluminum clad spent fuel in water. - Tech.Rep.Ser. № 418. - Vienna: IAEA, 2003. – pp. 209.

47. Краст Х.Б., Лайвиньш М.Э., Бялобжеский А.В., Тилткс Ю.Е. Исследование алюминиевой оболочки отработанных твэлов реактора ИРТ-200 // Атомная Энергия. – Москва, 1969. -т. 27, вып. 4. – С.286-289.

48. Хофман А., Дидык А.Ю., Штеке В. и др. Влияние ядерных реакций на свойства сплавов Al–Mg–Si после длительной эксплуатации в исследовательских реакторах // P14 – 2004-174 . Институт атомной энергии, Сверк, Республика Польша.– С. 1-13.

49. Ueyama D., Saitoh Y., Hori F., Kaneno Y., Nishida K.,Dohi K., Soneda N., Semboshi S., Iwase A. Effects of energetic heavy ion irradiation on hardness of Al–Mg–Si alloys // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. - 2013. -V. 314. –P. 107–111.

50. Карасев В.С., Зарицкий Н.С., Мамчич С.Д. и др. Структура и свойства сплава САВ-1 после длительного реакторного облучения // Радиационное материаловедение: Труды Международной конференции по радиационному материаловедению, Алушта, 22-25 мая, 1990. - Харьков: ХФТИ, 1991,. - т. 8.– С. 112-117.

51. Hazcy D.J., Bullough R. and Braileford A.D. Observation and analysis of dam&ge structure in Al and Al/Kg (N4) alloy after irradiation with 100 and 400 keV aluminium ions // Journal of Nuclear Materials. – 1976. - v.62, N1. –pp.73-88.

52. Hajewska E. Investigation of the properties of aluminium alloys used in the construction of nuclear research reactors // Raport IAE-2155/VI, Institute of Atomic Energy, Department of Reactor Materials 05-400. - Otwock-Świerk, Poland, 1993. – pp. 1-48.

53. Minitz A., Shtechman A et al. Mechanical properties and microstructure of neutron irradiated cold worked Al-6063 alloy // J. Nucl. Mater. -1998. - V. 252. – P. 79-88.
54. Слезов В.В., Субботин А.В., Осмаев О.А. Влияние облучения на временную эволюцию микроструктуры в сплавах // Вопросы атомной науки и техники. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. - 2005. - №5 (88). – С. 10-15.
55. Слезов В.В., Субботин А.В., Осмаев О.А. Эволюция микроструктуры в облучаемых материалах. - ФТТ. – С.Петербург, 2005. - Т. 47, вып. 3. – С. 463-468.
56. Yeon Soo Kim, Byoung Jin Cho, Dong-Seong Sohn. Thermal conductivity modeling of U-Mo/Al dispersion fuel // Journal of Nuclear Materials. - Elsevier, 2015. - Vol. 466 – pp. 576-582.
57. Douglas E., Tanja K. A model to predict thermal conductivity of irradiated U–Mo dispersion fuel // Journal of Nuclear Materials. - Elsevier, 2016. -Vol. 473. – pp.309-319.
58. Баранов В.Г., Д.П. Шорников и др. Особенности взаимодействия топливной композиции уран−молибден−продукты деления с алюминиевой матрицей при наличии барьерных покрытий // Перспективные материалы. - 2009. - №1. – С. 22-30.
59. Баранов В.Г., Нечаев. В.В., Д.П. Шорников и др. Моделирование взаимодействие уран-молибденового топлива с алюминиевой матрицей при глубоком выгорании //Атомная энергия.- Москва, 2010. -Т.108, №5. - С.288-293.
60. Шорников Д. П. Особенности взаимодействия топливной композиции уран−молибден−продукты деления с алюминиевой матрицей при наличии барьерных покрытий: Автореф. дис….. канд. техн. наук. – Москва, 2010.-24 с.
61. Беляев А.И., Бочвар О.С., Буйнов Н.Н. и др. Металловедение алюминия и его сплавов / Справочник. - М.: Металлургия, 1983. – 280 с.

62. Алюминиевые сплавы (свойства, обработка, применение). Справочник / под ред. Х. Нильсена. Пер. с нем. - М.: Металлургия,1979. – 679 с.

63. Альтман М. Б., Арбузов Ю. П., Бабичев Б. И. и др. Алюминиевые сплавы. Применение алюминиевых сплавов. - М.Металлургия, 1985. – С 344.

64. Аден В.Г., Карташев Е.Ф., Лукичев В.А. и др. Российская программа снижения обогащения топлива в исследовательских реакторах // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. - 2005. - №5. –С. 3-9.

65. Аден В.Г., Карташев Е.Ф., Соколов С.А. Снижение обогащения топлива в исследовательских реакторах //Атомная энергия.- Москва, 2007. -Т.103, №1. - С.70-72.

66. Baytelesov S.A., Dosimbaev A.A., Kungurov F.R., Salikhbaev U.S. Neutron-physical and thermohydraulic calculations of VVR-SM with high- and low-enrichment uranium fuel assemblies // Atomnaya Energiya. –Moscow, 2008.- Vol. 104, No. 5. - pp. 349–354.

67. Байтелесов С.А., Досимбаев А.А., Кунгуров Ф.Р., Салихбаев У.С. Расчет аварийных ситуаций при конверсии исследовательского реактора ИЯФ АН РУз // Атомная энергия. – Москва, 2008. -т. 104, вып. 6.- С. 339-343.

68. Салихбаев У.С., Коблик Ю.Н., Досимбаев А.А., Байтелесов С.А., Кунгуров Ф.Р. К повышению эксплуатационного ресурса ТВС в реакторе ВВР-СМ АН РУз // Атомная Энергия.- Москва, 2011.- т.110, вып.5.- С.257-262.

69. Беляев С.П., Волков А.Е., Коноплева Р.Ф., Назаркин И.В., Разов А.И., Соловей В.Л., Чеканов В.А. Влияние нейтронного облучения на мартенситные превращения и эффект памяти формы в сплаве TiNi // Физика твердого тела, 1998. - Т. 40, вып. 9. – С. 1705-1709.

70. Ма Б.М. Материалы ядерных энергетических установок. Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 408 с.

71. Бекман И.Н. Ядерная индустрия. - Москва, 2005. – 867 с.

72. Калина Б. А. Физическое материаловедение: Том 6. Часть 2. Ядерные топливные материалы. – М.: МИФИ, 2008. – 604 с.

73. Э.И. Денисова, А.В. Шак. Измерение теплопроводности на измерителе ИТ-λ-400. - Екатеринбург: Изд.: ГОУ-ВПО УТТУ, 2005. – 35 с.

74. Коротких А.Г. Теплопроводность материалов. Учебное пособие. –Томск, 2011. – 97 с.

75. Охотин А.С., Боровикова Р.П., Нечаева Т.В., Пушкарский А.С. Теплопроводность твердых тел. Справочник. - М. Энергоатомиздат, 1984. –320 с.

76. Берман Р. Теплопроводность твердых тел. - М: Мир, 1979. – 287 с.

77. Шатунов Е.С. Теплофизические измерения в монотонном режиме. - Энергия,1972. - 143с.

78. Ненишев А.С., Иванов А.Л. Определение теплопроводности при стационарном тепловом режиме. - Омск , 2008. - С.-33.

79. Байтелесов С.А., Досимбаев А.А., Салихбаев У.С. и др. Нейтронно-физические и теплогидравлические расчеты ВВР-СМ с ТВС из высоко- и низкообогащенного урана // Атомная энергия. – Москва, 2008. - Т. 104, вып. 5. – С. 269-273.

80. Кунце Х.И. Методы физических измерений. - М.: Мир, 1989. – 216 с.

81. Смирнов И.А, Тамарченко В.И. Электронная теплопроводность в металлах и полупроводниках. - Л.: Наука,1977.– 151 с.

82. Алерс Дж. Использование измерений скорости звука для определения температуры Дебая. В сб: Физическая акустика. -М: Мир, 1968, – т. 3Б, – С. 13–61.

83. Могилевский Б.М., Чудновский А.Ф.. Теплопроводность полупроводников. - М.: Наука, 1972 г. – 536 с.

84. Гуриева Е.А., Константинов П.П., Прокофьева Л.В. и др. Теплопроводность легированных твердых растворов на основе PbTe с нецентральными примесями. – ФТП. – 2006. - т. 40, вып. 7. – С. 783-787.

85. P. Olson Arne and M. Kalimullah, A Users Guide to the PLTEMP/ANL V3.5 Code, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois.- USA. 2008.-P.273.

86. Майлина Х.Р., Никулин Ю.А., Прокофьев Л.В., Равич Ю.И. Электронная теплопроводность сильно легированного селенида свинца // ФТТ. -1990. - т. 32, вып. 2. –С. 493-496 .

87. Жилин А.С., Jianguo L., Ялунина В.Р., Быков В.А., Токарев В.В., Варламенко Д.С. Влияние кремния на теплопроводность Al-Si-Fe сплавов при комнатной температуре // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов VII Всероссийской научно-практической конференции.– Екатеринбург, 2018. – С. 101–104.

88. Уманский Я.С., Скаков Ю.А. Физика металлов. Атомное строение металлов и сплавов: Учебник для вузов. – М.: Атомиздат, 1978. – 352 с.

89. Динс Дж, Виньярд Дж. Радиационные эффекты в твердых телах. - М.:ИИЛ, 1960. –248 с.

90. Данилов С.Е., Арбузов В.Л., Гощицкий Б.Н., Карькин А.Е., Павлов В.А., Пархоменко В.Д. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. - 2007. - №2. –С. 43-47.

91. Жданов Г.С. Физика твердого тела. - М.:МГУ, 1962. –501 с.

92. Королёв А.П., Баршутин С.Н. Материалы электроники и электротехники: учебное пособие. - Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2010. –80 с.

93. Alikulov Sh.A., Akhmedzhanov F.R., Baytelesov S.A., Boltabaev A.F., Kungurov F.R., Rakhimov E.T., Salikhbaev U.S. High-Temperature Electric and Thermal Conductivity of the Aluminum Alloys SAV-1 and AMG-2 // Atomic Energy. – Moscow, 2015–Vol. 117, No 5. – pp. 334-339.

94. Аликулов Ш.А., Ахмеджанов Ф.Р., Байтелесов С.А., Болтабаев А.Ф., Рахимов Э.Т., Салихбаев У.С. Действие нейтронного излучения на структуру и электропроводность алюминиевого сплава САВ-1 //Узбекский Физический Журнал. – Ташкент, 2015. - Том 17, № 4. – С. 248-253.

95. Салихбаев У.С., Аликулов Ш.А., Ахмеджанов Ф.Р., Байтелесов С.А., Кунгуров Ф.Р., Болтабоев А.Ф. Влияние нейтронного облучения на теплопроводность алюминиевого сплава САВ-1 // Узбекский Физический Журнал. – Ташкент, 2013. - № 3-4. – С. 197-203.

96. Абдукадырова И.Х., Аликулов Ш.А. Особенности процесса изменения теплопроводности обработанных в ядерном реакторе малыми дозами алюминиевых сплавов типа САВ-1 // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – Саров (Россия), 2012. - №1(105).– С. 21-25,

97. Байтелесов С.А., Кунгуров Ф.Р., Рахимов Э.Т., Таджибаев Д.П., Аликулов Ш.А. Влияние реакторного излучения на теплопроводность конструкционного материала реактора САВ-1 // «Замонавий физиканинг долзарб муаммолари»: Республика ёш олимлар ва иқтидорли талабалар семинари материаллари. – Самарқанд, 2010. – С. 76-78.

98. Салихбаев У.С., Абдукадырова И.Х., Байтелесов С.А., Аликулов Ш.А. К вопросу о радиационном эффекте теплофизических свойствах конструкционных сплавов // «Фундаментальные и прикладные вопросы физики»: Международная конференция, посвященная 80-летию академика М.С. Саидова. – Ташкент, 2010. – С. 370-372.

99. Абдукадырова И.Х., Байтелесов С.А., Аликулов Ш.А. О температурной зависимости теплофизических свойств конструкционных алюминиевых сплавов // «Ядерная и радиационная физика»: 8–я международная конференция. – Алматы, 2011. – С. 80.

100. Абдукадырова И.Х., Аликулов Ш.А. Влияние нейтронного излучения на теплофизические параметры некоторых конструкционных материалов // «Актуальные вопросы мирного использования атомной энергии»: Международная конференция молодых ученых и специалистов. – Алматы, 2012. – С.14-15.

101. Abdukadyrova I.Kh., Alikulov Sh., Haydarov T., Boltaboev A.F. Effects of radiation on thermal and mechanical parameters of some construction materials //

“Nuclear Science and its Application” International Conference, Samarkand. – Tashkent, 2012. – pp. 285-286.

102. Аликулов Ш.А. Влияние нейтронного облучения на теплопроводность алюминиевого сплава САВ-1 // «Физика и экология»: Республиканская научно - практическая конференция с участием зарубежных ученых. – Нукус, 2013. – Р. 285-286.

103. Akhmedzhanov F.R., Alikulov Sh.A., Baytelesov S.A., Boltabaev A.F., Kungurov F.R., Salikhbaev U.S. Kinetics of radiation damages in SAV-1 alloy under neutron irradiation // 3d Europen Nuclear Physics Conference (EuNPC). – Groningen (Netherlands), 2015.– pp.75.

104. Akhmedzhanov F.R., Alikulov Sh.A., Baytelesov S.A., Boltabaev A.F., Kungurov F.R., Salikhbaev U.S. Radiation damages in SAV-1 alloy under neutron irradiation // “New Trends of Development Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements and Prospects”: Book of abstracts of International Symposium. – Tashkent, 2016. – pp. 244-245.

105. Аликулов Ш.А., Ахмеджанов Ф.Р., Байтелесов С.А., Болтабаев А.Ф., Кунгуров Ф.Р., Абдуманапов У.Ж, Бекбаев С.М. Влияние нейтронного излучения на электропроводность сплава САВ-1 // «Актуальные проблемы и тенденции инноваций в современной науке и образовании»: Материалы Международной научно – практической конференции.–Туркестан, 2017. – С. 479–481.

106. Аликулов Ш.А., Байтелесов С.А., Кунгуров Ф.Р. Зависимость удельного сопротивления сплава САВ-1 от флюенса быстрых нейтронов и от температуры // V Республиканская конференция молодых физиков Узбекистана “Ядерная физика и ядерные технологии”. – Ташкент, 2018. – С. 88-91.

107. Байтелесов С.А., Кунгуров Ф.Р., Юлдашев Б.С. Анализ различных конфигураций активной зоны реактора ВВР-СМ// Доклады академии наук Республики Узбекистан. – Ташкент, 2019. - № 2. – С. 31-37.

108. Instruction manual model 3207 digital micro-ohm meter, USA.-2011.- p. 35.