

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ  
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.FM/Т.33.01 РАҚАМЛИ  
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ**

**БОЛТАБАЕВ АЗИЗБЕК ФАРХОДОВИЧ**

**АЛЮМИНИЙ ҚОТИШМАЛАРИДА ЧИЗИҚЛИ ВА НОЧИЗИҚЛИ  
ЭЛАСТИК ВА ИССИҚЛИК ХОССАЛАРИНИНГ ЎЗARO  
БОҒЛИҚЛИГИ**

**01.04.07 – Конденсирланган ҳолат физикаси**

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси  
АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2021**

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)  
диссертацияси автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации  
доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам**

**Contents of the abstract of dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on  
physical and mathematical sciences**

**Болтабаев Азизбек Фарходович**

Алюминий қотишмаларида чизиқли ва нозиқлиқли эластик ва  
иссиқлик хоссаларининг ўзаро боғлиқлиги..... 3

**Болтабаев Азизбек Фарходович**

Взаимосвязь линейных и нелинейных упругих и тепловых свойств  
в алюминиевых сплавах..... 24

**Boltabaev Azizbek Farxodovich**

Interconnection of linear and nonlinear elastic and thermal properties in  
aluminum alloys..... 44

**Эълон қилинган ишлар рўйхати**

Список опубликованных работ  
List of published works ..... 48

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ  
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.FM/Т.33.01 РАҚАМЛИ  
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ**

**БОЛТАБАЕВ АЗИЗБЕК ФАРХОДОВИЧ**

**АЛЮМИНИЙ ҚОТИШМАЛАРИДА ЧИЗИҚЛИ ВА НОЧИЗИҚЛИ  
ЭЛАСТИК ВА ИССИҚЛИК ХОССАЛАРИНИНГ ЎЗARO  
БОҒЛИҚЛИГИ**

**01.04.07 – Конденсирланган ҳолат физикаси**

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси  
АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2021**

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2021.3.FM637 рақам билан рўйхатга олинган.**

Диссертация Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академияси Ядро физикаси институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифаси ([www.inp.uz](http://www.inp.uz)) ва «ZiyoNet» ахборот-таълим тармоғида ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)) жойлаштирилган.

**Илмий раҳбар:**

**Ахмеджанов Фарход Рашидович**

физика-математика фанлари доктори, доцент

**Расмий оппонентлар:**

**Ашуров Мухсин Хуррамович**

физика-математика фанлари доктори, профессор, академик

**Мирзаев Сирожиддин Зайниевич**

физика-математика фанлари доктори, профессор

**Етакчи ташкилот:**

**И.А. Каримов номидаги Тошкент давлат техника университети**

Диссертация ҳимояси Ядро физикаси институти ҳузуридаги DSc.02/30.12.2019.FM/T.33 рақамли Илмий кенгашнинг 2021 йил «\_\_» \_\_\_\_\_ соат \_\_\_\_ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100214, Тошкент ш., Улуғбек кўрғони, ЯФИ; тел. (+99871)289-31-18; факс (+99871)289-35-65; e-mail: [info@inp.uz](mailto:info@inp.uz)).

Диссертация билан Ядро физикаси институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин. ( \_\_\_\_\_ рақам билан рўйхатга олинган.) Манзил: 100214, Тошкент ш., Улуғбек кўрғони, ЯФИ; тел. (+99871)289-31-19.

Диссертация автореферати 2021 йил «\_\_» \_\_\_\_\_ да тарқатилди.  
(2021 йил «\_\_» \_\_\_\_\_ даги \_\_\_\_ рақамли реестр баённомаси.)

**М.Ю. Ташметов**

Илмий даражалар берувчи  
илмий кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., профессор

**О.Р. Тожибоев**

Илмий даражалар берувчи  
илмий кенгаш илмий котиби, PhD.ф.-м.н

**С.В. Артёмов**

Илмий даражалар берувчи илмий  
кенгаш қошидаги илмий семинар раиси ўринбосари,  
ф.-м.ф.д., профессор

## **КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг аннотацияси)**

**Диссертация иши мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Дунёда сўнги йилларда қаттиқ жисмларнинг чизикли ва ночизикли эластиклик ва иссиқлик хоссалари орасидаги ўзаро боғланишларга қизиқиш, уларнинг ночизикли хусусиятлари материалдаги ташқи таъсирлар туфайли юзага келадиган структура ўзгаришларига сезгирлиги билангина эмас, балки кўп ҳолларда чизикли эластиклик хоссаларини ҳам белгилаб бериши билан изоҳланади. Грюнайзен параметри (ангармонизм доимийси) эластик ночизиклиликни характерловчи асосий параметрлардан бири бўлиб, панжара тебранишлари нормал модалари частоталарининг система ҳажми ўзгаришларига боғлиқ равишда ўзгариши билан аниқланади. Одатда у ҳажмий иссиқлик кенгайиши коэффициентини, ҳажмий сиқилишнинг изотермик модули, моляр ҳажм ва моляр иссиқлик сиғими ҳақидаги маълумотларга таяниб Грюнайзен тенгламасидан топилади. Анггармонизм константасини аниқлашнинг янги усуллари топиш ва атомлараро ўзаро таъсир кучларининг ночизиклиликни характерловчи Грюнайзен параметри билан чизикли эластиклик назариясининг маълум параметрлари орасидаги муайян боғлиқликларни ўрнатиш ҳеч шубҳасиз илмий ва амалий қизиқиш уйғотади ва долзарб масала ҳисобланади.

Бугунги кунда дунёнинг кўпгина мамлакатларида турли материалларнинг ночизикли физикавий хоссаларини, шу жумлада металл қотишмаларининг ночизикли эластиклик ва иссиқлик хоссаларини тадқиқ қилинмоқда. Конденсацияланган муҳитларнинг айнан эластик ночизиклилиги ва ночизикли иссиқлик хоссалари атомлараро ўзаро таъсир ангармонизми орқали боғланган. Бунда ҳолат тенгламасига кирувчи Грюнайзен параметри кристалл фонон спектрининг ўзига хослигини акс эттиради ва бир қатор муҳим физикавий эластиклик ва иссиқлик характеристикаларини белгилаб беради. Улар қаторига ночизикли (иссиқликдан кенгайиш, иссиқлик ўтказувчанлик, товуш тўлқинларини ютиш, эластиклик хоссаларининг температурага боғлиқ ўзгариши) характеристикалар ҳам, солиштирма иссиқлик сиғими, ҳар томонлама сиқилиш модули, сиқилувчанлик каби чизикли характеристикалар ҳам киради.

Сўнги йилларда Ўзбекистон Республикасида ҳам материалшунослик соҳасида фундаментал тадқиқотларга – мамлакат иқтисодиётининг турли соҳаларида конструкцион материаллар сифатида қўлланадиган янги материалларни излаш ва аввалдан ишлатилаётган материалларнинг, шу жумладан металл ва металл қотишмаларининг хоссаларини тадқиқ қилишга катта аҳамият берилмоқда. Мамлакатимизда атом энергиясида илм-фанни ривожлантириш ва уни келгусида амалиётда қўллаш учун катта аҳамиятга эга бўлган ушбу фундаментал тадқиқотлар йўналишлари 2017-2021 йилларда

Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш Стратегиясида<sup>1</sup> ўз аксини топган, шунингдек 2019-2029 йилларга мўлжалланган Ўзбекистон Республикасида атом энергиясини ривожлантириш концепциясида ҳам.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 2 февralидаги ПҚ-4947-сон “2017–2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар Стратегияси ҳақида”, 2017 йил 16 февралдаги ПҚ-4958-сон “Олий таълимдан кейинги таълим тизимини янада такомиллаштириш тўғрисида”, 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон “Фанлар Академияси фаолиятини, илмий-тадқиқот жараёнларини ташкил қилиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чоратadbирлари ҳақида” қарорлари ҳамда ушбу соҳадаги бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

**Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги.** Диссертация тадқиқотлари республика фан ва технологияларни ривожлантиришнинг II. «Энергетика, энергия тежамкорлиги ва муқобил энергия манбалари» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Ҳозирги кунда дунёда бир қатор етакчи олимлар, масалан: америкалик (Y.S. Kim, A. Yasout), россиялик (Коноплев К.А., Фридман С.Р., Орлов С.П., В.М. Лебедев, С.Н. Вотинов), қозоғистонлик (О.П. Максимкин, А.В. Яровчук, Л.Г. Турубарова), польшалик (В. Штеке, Т. Вагнер, Е. Хаевска), исроиллик (А. Minitz, А. Shtechman), украиналик (В.Н. Воеводин ва бошқалар), ўзбекистонлик (У.С. Салихбаев, И. Хидиров, С.А. Байтелесов ва бошқалар) ва бошқа мутахассисларнинг ишлари шундай САВ-1 ва АМГ-2 алюминий қотишмаларини экспериментал ва назарий тадқиқ қилишга бағишланган.

Бу тадқиқотлар натижасида САВ-1 нинг ВВР-СМ атом реакторининг актив зонасида эксплуатациясидан кейин коррозияга чидамлилиги ҳамда Al–Mg–Si системадаги қотишмаларнинг микроструктураси ва хоссаларига нейтронлар билан нурлантиришнинг таъсири тадқиқ қилинган; САВ-1 ни реакторда ва реактордаги эксплуатациядан кейинги ҳолати тадқиқотларини бажариб, унинг радиацияга чидамлилиги даражаси аниқланган, флюенснинг юқори қийматларигача тез электронлар билан нурлантирилган САВ-1 қотишманинг нано ўлчамли тузилиши ўрганилган, реактор нурланишининг САВ-1 ва АМГ-2 қотишмаларнинг микроструктураси ва микроқаттиқлигига электр ва иссиқлик ўтказувчанлигига таъсири тадқиқ қилинган.

Шундай қилиб, САВ-1 ва АМГ-2 қотишмаларнинг тузилиши, иссиқлик ва электр хоссалари бир қатор ишларда тадқиқ қилинган, бироқ уларнинг эластиклик хоссалари кам ўрганилган, уларнинг эластиклик хоссаларига доир мавжуд маълумотлар ўзаро бир-бирига мос келмайди. Айни пайтда, акустик тўлқинларнинг тарқалиш ва сўниш тезликлари эластиклик

---

<sup>1</sup> 2017 йил 7 февралдаги № ПФ-4947 сонли “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида” Ўзбекистон Республикаси Президентининг Фармони.

константалари билан тўғридан-тўғри функционал боғланган, бу константаларнинг қийматлари ўз навбатида қотишмаларнинг таркиби ва структурасига кучли тарзда боғлиқдир. Шу сабабдан қотишмаларнинг чизиқли ва ночизиқли эластиклик ва иссиқлик хоссалари орасидаги муносабатларни аниқлаш уларда ташқи таъсирлар натижасида юз берадиган структура ўзгаришларини ишончлироқ баҳолаш имконини беради. Бунда ночизиқлилиқнинг асосий характеристикаси – Грюнайзен параметри (ангармонизм доимийси) ни тажрибада ўлчаб топиладиган катталикларнинг энг кам миқдоридан аниқлаш долзарб масалалардан биридир.

**Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация иши Ядро физикаси институти илмий-тадқиқот ишлари режасининг ФА-А3-Ф004 “ЎзР ФА ЯФИДаги ВВР-СМ ядро реакторини эксплуатациядан чиқаришда ядровий ва радиациявий хавфсизлиқни таъминлаш усуллари ишлаб чиқиш” (2015-2017) амалий лойиҳаси доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** алюминий қотишмаларининг чизиқли ва ночизиқли эластиклик ва иссиқлик хоссаларининг ўзаро боғлиқлигини уларнинг таркибидаги асосий киритма элементлар миқдorigа боғлиқ равишда аниқлашдан иборат.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

САВ-1 ва АМГ-2 алюминий қотишмаларида акустик тўлқинларнинг тезликлари ва сўниши, уларнинг таркибидаги киритма элементлар миқдorigа ва температурага боғлиқ равишда аниқлаш;

АМГ-2 алюминий қотишма панжарасида киритма атомлари ҳаракатининг фаолланиш энергияси аниқлаш;

САВ-1 ва АМГ-2 алюминий қотишмаларида Грюнайзен параметрни қиймати ва унинг температурага боғлиқлигини аниқлаш;

нейтронлар билан нурлантирилган САВ-1 ва АМГ-2 алюминий қотишмаларда панжара параметрининг динамикаси ўзгаришини ўрганиш.

**Тадқиқот объекти** сифатида САВ-1 ва АМГ-2 алюминий қотишмаларининг чизиқли ва ночизиқли эластиклик ва иссиқлик хоссалари олинган.

**Тадқиқот предмети** САВ-1 ва АМГ-2 алюминий қотишмаларида акустик тўлқинларнинг тарқалиш тезлиги ва сўниш коэффиценти, иссиқлик ўтказувчанлик панжара параметрлари ташкил этади.

**Тадқиқот усуллари.** Акустик тўлқинлар тарқалиши тезлиги ва сўниш коэффиценти ўлчашнинг импульсли ва импульс-интерференцияли усуллари қўлланди.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

биринчи марта тажрибада САВ-1 ва АМГ-2 алюминий қотишмаларида акустик тўлқинларнинг 10 ва 50 МГц оралиқда кўндаланг, бўйлама тезликлари ва сўниш коэффиценти аниқланган;

АМГ-2 қотишма панжарасида магний атомлари ҳаракатининг фаолланиш энергияси 0,38 эВ га тенглиги ва киритилиш позициясида магний атомларининг ўртача тебрланиш частоталари тақрибан  $3 \cdot 10^{12}$  Гц га тенглиги аниқланган;

биринчи марта САВ-1 (2.04) ва АМГ-2 (2.06) алюминий қотишмаларида Грюнайзен параметри қиймати ва унинг температурага боғлиқлиги аниқланган;

эластиклик модулларининг, шу жумладан Юнг модулининг, силжиш модули ва ҳажмий эластиклик адиабатик модулининг алюминий қотишмаларидаги магний киритмаси концентрациясига 0.45 – 2.10 % боғлиқлиги аниқланган;

импульс-интенференция усули асосида материалларда акустик тўлқинларнинг тезлиги ва сўнишини ўлчаш аниқлигини ошириш имконини берадиган қурилма йиғилган.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** қуйидагилардан иборат:

ядро реакторларида конструкцион материал сифатида ишлатиладиган алюминий қотишмаларнинг, структура ўзгаришлари ва эластиклик хоссаларини назорат қилишнинг акустика самарадорлиги кўрсатилган;

САВ-1 ва АМГ-2 қотишмаларда кузатилган панжара параметрининг радиация таъсирида ўзгариши иккита ўзаро рақобатлашувчи механизмлар ва уларни ҳажмида тугунлараро жойлашган атомлар ҳамда вакансион ғовақлар концентрациясининг нейтронлар билан нурлантириш дозаларига мос равишда боғлиқлиги сабабли юз бериши кўрсатиб берилган.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги** қўйилган вазифаларнинг физикавий асосланганлиги, металл қотишмаларининг эластиклик ва иссиқлик хоссаларини тадқиқ қилишнинг яхши текширилган замонавий усуллари қўлланганлиги, тажриба натижаларининг катта ҳажми ва уларнинг конденсацияланган ҳолат физикаси фундаментал қонунлари ҳамда асосий қоидаларига мувофиқлиги, олинган натижалар ва ҳулосаларнинг изчиллиги ва бошқа муаллифларнинг айрим натижаларига мос келиши билан белгиланади.

**Тадқиқот натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти.**

Натижаларнинг илмий аҳамияти САВ-1 ва АМГ-2 қотишмаларда эластиклик модулларининг таркибдаги магний ва кремний киришмалари эффектив концентрациясига боғлиқлиги нейтронлар билан нурлантириш таъсирида ўзгаришининг аниқланишидадир.

Натижаларнинг амалий аҳамияти тадқиқ қилинган қотишмаларнинг эластиклик хоссаларини башорат қилиш ва алюминий қотишмалари асосидаги конструкцион материалларнинг хоссаларини мақсадли бошқариш имконияти яратилганидадир.

**Тадқиқот натижаларининг амалга тадбиқ қилиниши.** Алюминий қотишмаларининг чизикли ва ночизикли эластиклик ва иссиқлик хоссаларининг ўзаро боғлиқлиги аниқлаш бўйича олинган натижалар асосида:



САВ-1 ва АМГ-2 алюминий қотишмалардаги бўйлама ва кўндаланг акустик тўлқинларнинг аниқланган тезлиги ва сўниш коэффициентлари, ҳамда АМГ-2 қотишма панжарасидаги магний атомларининг ҳаракат активлик энергияси ноёб илмий қурилма “ВВР-СМ Ядровий тадқиқот реакторида” фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академияси 2020-йил 20-августдаги № 2/1255-2320 сонли хати). Илмий натижаларининг қўлланилиши ВВР-СМ реакторининг температурага боғлиқ иш режимини ҳисоблаш имконини берган;

САВ-1 ва АМГ-2 алюминий қотишмаларда аниқланган Грюнайзен параметри ва унинг температурага боғлиқлиги ноёб илмий қурилма “ВВР-СМ Ядровий тадқиқот реакторида” фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академияси 2021-йил 20-августдаги № 2/1255-2320 сонли хати). Илмий натижаларининг қўлланилиши САВ-1 ва АМГ-2 алюминий қотишмалардаги иссиқлик ўтказувчанлик ва иссиқлик қаршилиги коэффициентларини температурага боғлиқлигини башорат қилиш имконини берган;

Юнг модулининг, силжиш модули ва ҳажмий эластиклик адиабатик модулининг алюминий қотишмаларидаги магний киритмаси концентрациясига аниқланган боғлиқлиги БФ2-006 “Бўлиниш маҳсулотлари ва трансурани изотоплар активлигини минималлаштириш ва уларни ВВР-СМ ядро реактори конструкцион материалларга таъсирини ўрганиш” фундаментал лойиҳаси доирасида фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академияси 2021-йил 20-августдаги № 2/1255-2320 сонли хати). Илмий натижаларининг қўлланилиши ВВР-СМ ядро реактори нурланиш дозасига боғлиқ иссиқлик ажратувчи қурилмасида конструкцион материал сифатида фойдаланилувчи САВ-1 қотишма кенгайтиш даражасини баҳолаш имконини берган;

акустик тўлқинларнинг тезлиги ва сўнишини ўлчайдиган импульсли интерференцион метод ишланмаси материалларда акустик тўлқинларнинг тезлигини юқори аниқликда ўлчаш қурилмаси сифатида Ўзбекистон Республикаси интеллектуал мулк Агентлиги томонидан рўйхатдан ўтказилган (Фойдали моделга 2020-йил 28-сентябрда берилган Ўзбекистон Республикаси патенти № ФАП 012545). Илмий натижаларининг қўлланилиши ВВР-СМ ядро реакторининг актив зонасида ишлайдиган САВ-1 қотишмасидан тайёрланган қурилмаларни механик кучланишини аниқлаш имконини берган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Диссертация мавзуси бўйича олиб борилган тадқиқотларнинг асосий натижалари 11 та халқаро ва республика миқёсидаги илмий-амалий анжуманларда маъруза ва муҳокама қилинган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши.** Диссертация мавзуси доирасида жами 20 та илмий иш нашр этилган, жумладан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари

асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 9 та мақола, шулардан 1 таси ҳорижий журналларда нашр этилган.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Диссертация иши кириш, тўртта боб, хулоса ва фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертация ҳажми 106 бетни ташкил этади.

## **ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ**

**Кириш қисмида** диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотларнинг Республикадаги фан ва технологияларни ривожлантиришнинг асосий устивор йўналишларига боғланиши очиб берилган, муаммонинг ўрганилганлик даражаси муҳокама қилинган, мақсад ва вазифалар шакллантирилган. Шунингдек тадқиқотнинг предмети ва тадқиқот усуллари аниқлаб олинган, тадқиқотнинг илмий янгилиги баён қилинган, олинган натижаларнинг ишончлилиги асослаб берилган, уларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган, ишнинг натижаларини амалга тадбиқ қилиш ва апробацияси ҳақида, шунингдек диссертация ҳажми ва тузилиши ҳақида қисқа маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг **“Қаттиқ жисмларда акустик тўлқинлар қисқа назарияси ва алюминий қотишмаларининг нуқсонлари ва эластиклик хоссалари”** деб номланган биринчи бобида қаттиқ жисмларда акустик тўлқинлар назарияси қисқача баён қилинган ва алюминий қотишмаларида нуқсонлар ва эластиклик хоссалари обзори берилган. Акустик тўлқинлар ва уларнинг қаттиқ жисмларда тарқалиш қонуниятлари классик мабларга таянган ҳолда баён қилинган. Акустик тўлқинларнинг сўниш коэффициентига алоҳида эътибор қаратилди, у тўлқиннинг муҳит ва нобиржинслиликлар билан ўзаро таъсирлашуви оқибатида тўлқин амлитудасининг заифлашишини характерлайди.

Биринчи бобнинг алоҳида бўлими кристалл панжарадаги нуқсонларнинг асосий типлари ва уларни синфлаштиришга бағишланган. Материалларнинг физикавий-механик характеристикалари ўзгаришига, биринчи навбатда нишоннинг атомлари билан келиб урилаётган зарралар (нейтронлар, ионлар) нинг эластик ва ноэластик ўзаро таъсирлашуви жараёнлари туфайли кристалл панжара атомларини силжиши орқали юзага келадиган, асосий жараёнлар кўриб чиқилди.

Бобда асосий эътибор САВ-1 ва АМГ-2 ҳамда уларга турдош АМГ-6 алюминий қотишмаларининг эластиклик хоссаларига доир ишлар обзорида қаратилган. Бунда таркибида киритма атомлар миқдори турлича бўлган алюминий қотишмаларининг чизиқли ва ночизиқли эластиклик хоссалари ўрганилган ишлар қараб чиқилган. Алюминий қотишмаларида иккинчи тартибли эластиклик коэффициентлари орасидаги фарқ 30% дан ошмаслиги кўрсатиб берилган. Айни вақтда, худди шу қотишмаларда учинчи тартибли эластиклик доимийларининг қийматлари ўнлаб марта фарқланиши мумкин, яъни ночизиқли доимийлар материалнинг структураси ва кимёвий таркибига сезгирроқ бўлади.

Келтирилган обзордан, қотишмаларнинг эластиклик хоссалари бўйича мавжуд ишлар ва ахборот ҳажми жуда катта бўлишига қарамасдан, эластик деформациялар соҳасида алюминий қотишмаларида бўладиган ўзгаришлар бўйича кўпгина масалалар очиқ қолаётгани ҳақида хулоса чиқарилди.

Диссертациянинг **“Намуналар ва тажриба усуллари”** номли иккинчи бобида тадқиқ қилинган САВ-1 ва АМГ-2 намуналарига ишлов бериш усуллари ва уларнинг характеристикаларига оид маълумотлар келтирилган. Алоҳида бўлим тадқиқ қилинаётган муҳитда турли йўллари босиб ўтган акустик тўлқинлар фазаларини солиштиришга асосланган Вильяс-Лэмб “импульс интерференцияси” усулида ишлаб чиқилган акустик тўлқинларнинг тезлиги ва сўнишини аниқлаш қурилмасига бағишланган. Унинг ўзига хослиги шунда-ки, ўлчаш тизимида амплитуда селектори киритилган, у муайян вақт оралиғида – ўтказиш вақти тирқишида очилади. Бу сериядаги у ёки бу импульсни ўтказиш ва унинг амплитудасини вольтметрда ўлчаш имконини беради. Бундай жараёнда, биринчидан, ўлчанган қўшни А1 ва А2 амплитудалар қийматларидан тўлқинларнинг сўниш коэффициентини  $\alpha$

$$\alpha = \frac{20 \lg(A_1/A_2)}{2L} \quad (1)$$

бунда  $L$  – намуна узунлиги, муносабатдан аниқлаш имконини беради. Иккинчидан, ўлчаш тизими генератор импульсларининг иккита стробидан радиоимпульсларнинг иккита сериясини шакллантиради. Бундай шароитда бир-бирига устма-уст тушган эхо-импульслар амплитудалари суммасибу импульсларни тўлдираётган тебранишлар орасидаги фазалар фарқига боғлиқ бўлади. Айтилган фазалар фарқини ЎЮЧ генератор частотасини бошқариб ўзгартириш мумкин.

Генератор частотасини ўзгартириш жараёнида сигнал амплитудасининг бир қатор интерференцион нуллари ва максимумлари кузатилади, уларнинг ҳолати частоталар шкаласида намунанинг узунлиги  $L$  ва ундаги акустик тўлқинлар тезлигига қуйидагича боғланади

$$\vartheta = 2L \cdot \Delta\nu, \quad (2)$$

бу ерда  $\Delta\nu$  – генераторни иккита частотасининг фарқи, қарама-қарши фазалар интерференциясига мос келади. Тезликни ўлчаш аниқлиги фойдали сигнални амплитуда ва вақт бўйича селекция қилиш ҳисобига оширилган ва ~0,01%га тенг.

Тадқиқ қилинган қотишмаларнинг иссиқлик ўтказувчанлик коэффициентини ИТ-λ-400 қурилмада динамик калориметрия усулида аниқланди. Қотишмалар намуналари ЎзР ФА ВВР-СМ ядро реакторининг вертикал каналида нурлантирилди. Нурлантириш натижасида

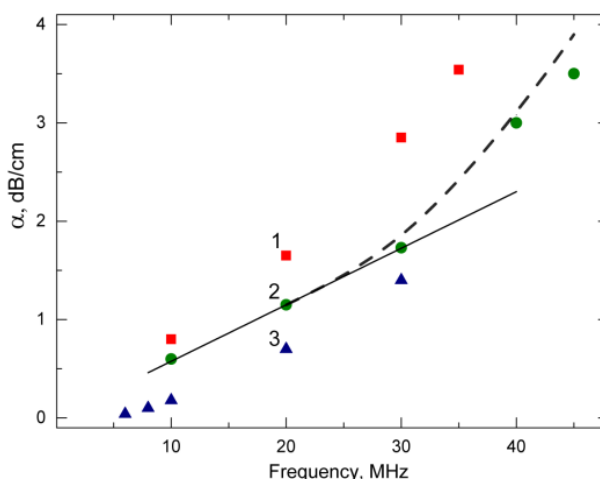
қотишмаларнинг нейтронларнинг ҳар-хил флюенсларида,  $3,8 \cdot 10^{16}$  н/см<sup>2</sup> дан  $0,9 \cdot 10^{20}$  н/см<sup>2</sup> гача, нурлантирилган намуналари олинди.

Диссертациянинг “Алюминий қотишмаларининг чизикли ва ночизикли эластиклик хоссалари” деб номланган учинчи бобида САВ-1 ва АМГ-2 алюминий қотишмаларида акустик тўлқинларни тезлиги ва сўнишини ўлчаш натижалари ва алюминий ҳамда АМГ-6 қотишма учун адабиётларда мавжуд маълумотлар келтирилган (1-жадвал). Ундан кўриш мумкин-ки, паст частоталарда чизикли частотавий боғланиш, 30 МГц дан юқоридарида квадратик частотавий боғланиш кузатилади.

**1-жадвал**

**Al ва САВ-1, АМГ-2, АМГ-6 қотишмаларда акустик тўлқинларнинг тезлиги ва сўниш коэффициентлари**

| Қотишма         | $v_L$ ,<br>10 <sup>3</sup> м/с | $v_S$ ,<br>10 <sup>3</sup> м/с | $v_L/v_S$ | $\alpha_L$ , дБ/см |         | $\alpha_S$ ,<br>дБ/см<br>10 МГц | Ўртача<br>тезлик<br>10 <sup>3</sup> м/с |
|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------|--------------------|---------|---------------------------------|-----------------------------------------|
|                 |                                |                                |           | 10 МГц             | 30 МГц  |                                 |                                         |
| Al [адаб]       | 6.44                           | 3.103                          | 2.08      | 0.26-0.4           | 0.9-1.3 | 2.2                             | 4.4979                                  |
| САВ-1           | 5.98                           | 2.95                           | 2.03      | 0.65               | 1.5     | 2.51                            | 4.2097                                  |
| АМГ-2           | 6.16                           | 3.02                           | 2.04      | 0.52               | 1.3     | 2.66                            | 4.3277                                  |
| АМГ-6<br>[адаб] | 6.34                           | 3.14                           | 2.02      |                    |         |                                 | 4.4689                                  |



Тўғри чизик ва штрихли эгри чизик мос равишда, сўнишнинг частотага чизикли ва квадратик боғлиқлигини тахмин қилиб ўтказилган

**1-расм. САВ-1 (1), АМГ-2 (2) қотишмаларда, ва Al (3) да бўйлама акустик тўлқинлар сўнишининг частотага боғлиқлиги**

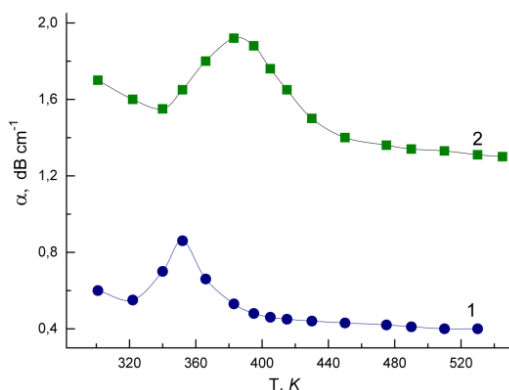
Назарияга кўра, товуш сўнишининг частота  $\nu$  га боғлиқлиги

$$\nu \geq \frac{g}{20d} \quad (3)$$

бу ерда  $g$  – акустик тўлқин тезлиги,  $d$  – кристаллитларнинг ўртача ўлчамлари, частотадан юқори частоталарда бузила бошлайди.

Бунинг сабаби, товушнинг сўнишида асосий хиссани акустик тўлқинларнинг кристалл зарраларида сочилиши беради ва паст частоталарда сўниш коэффиценти бу зарраларнинг ўлчамларига кучли боғланган бўлишидир. Сўнишнинг частотага боғланиши бўйича натижалар ва (3) муносабат қотишмадаги кристаллитларнинг ўртача ўлчамларини баҳолаш имконини беради. Бундай баҳолаш кристаллитлар ўлчамларининг АМГ-2 қотишма учун 10-15 мкм, САВ-1 учун 30-40 мкм қийматларни беради, бу адабиётларда мавжуд баҳолашларга мос келади. Шундай қилиб, акустик тўлқинларнинг қотишмаларда сўниши катталигини қиймати тўлқин узунлиги билан кристалл зарралари ўлчамлари орасидаги муносабатга жиддий тарзда боғлиқ бўлади.

Диссертациянинг “Алюминий қотишмаларида ультратовуш тўлқинлари сўнишининг температурага боғлиқлиги” номли учинчи бобнинг иккинчи бўлимида АМГ-2 қотишмада 10 ва 30 МГц частоталарда акустик тўлқинлар сўнишини тадқиқ қилишнинг натижалари келтирилган (2-расм). Кўриниб турибди-ки, ҳар иккала частотада ҳам сўнишнинг температурага боғланишида максимум кузатилади. Бу ён ёғига марказлашган кристалл панжарада киритма атом кўпинча бундай панжаранинг қирралари ўртасида ёки панжара марказида жойлашган бўлишига боғлиқдир. Бу киритма атомлар панжарани деформациялаб, тетрагонал симметрияга эга қийшайишлар ҳосил қилади. Энг катта қийшайишлар панжаранинг бир-бирига энг яқин иккита кўшни атомлари орасида, яъни асосий ўқлардан бири  $\langle 100 \rangle$  йўналишида юз беради. Чет атомлар киритишнинг ҳар учала тури тартибсиз аралашиб кетган, шунинг учун киритиш позицияларининг ҳар бирига киритма атомларнинг 1/3 қисми тўғри келади.



**2-расм. АМГ-2 қотишмада 10 МГц (1) ва 30 МГц (2) частотали бўйлама акустик тўлқинлар сўнишининг температурага боғланиши**

Акустик тўлқинлар тарқалаётганда атомларнинг тенг эҳтимолли тақсимланиши бузилади; кўпсонли киритма атомлар тетрагонал ўқли позицияларда жойлашган ҳолат мувозанат ҳолатига айланади, бу ўқ бўйлаб эластик деформация юзага келади. Натижада, киритма атомларнинг силжиши ва қайта ориентацияланиши ҳисобига янги мувозанат ҳолатига ўтиш содир бўлади, бу ҳолат температурага боғлиқ ўзгарувчи релаксация вақти  $\tau$  характерланади ва ультратовуш тўлқинлари учун сўнишнинг қуйидаги шартга жавоб берадиган максимумли релаксацион чўққиси кузатилади

$$\nu = \nu_0 e^{-U/kT} \quad (4)$$

бу ерда  $\nu_0$ –киритилиш позициясида киритма атомнинг тебранишлар частотаси,  $U$ –киритма атомлар ҳаракатининг фаолланиш энергияси,  $k$  – Больцман коэффиценти.

Бундай ўтиш учун зарур бўладиган фаолланиш энергиясининг қиймати киритма атомларнинг типи ва позициясига қараб аниқланади. АМГ-2 қотишмада релаксацион чўққиларнинг частотага боғлиқ силжиши бўйича аниқланган фаолланиш энергияси ( $E_A$ ) 0,38 эВ га тенг бўлиб чиқди ва афтидан, қотишма панжарасида магний киритма атомларининг ҳаракати билан боғланган.  $E_A$  нинг олинган қийматини (4) муносабатга қўйиб, киритиш позициясида магний атомларининг ўртачалашган тебраниш частотасини топамиз:  $\nu_0 \sim 3 \cdot 10^{12}$  Гц .

Сўниш катталиги қийматини акустик тўлқинлар сўнишининг бошқа бўлиши мумкин бўлган механизми (Ахиезер механизми) бўйича баҳолаш учун, биз Мэзон формуласидан фойдаланамиз:

$$\alpha = \frac{3 \cdot 8.68 \gamma^2 k T \omega^2}{2 \rho \vartheta^2 \vartheta_{cp}^2} \quad (5)$$

Бу ерда  $\rho$  - зичлик,  $\vartheta$  ва  $\omega$  – акустик тўлқиннинг тезлиги ва доиравий частотаси,  $\gamma$  - Грюнайзеннинг термодинамик параметри, унинг ўрнига Грюнайзеннинг акустиик параметри  $\gamma_a$  ни ишлатиш мумкин. Бу  $\gamma_a$  параметр, Беломестных В.Н. га кўра, изотроп материалда акустик тўлқинларнинг бўйлама ( $\vartheta_L$ ) ва кўндаланг ( $\vartheta_S$ ) тезликлари қийматларидан аниқланади.

$$\gamma = \frac{9(\vartheta_L^2 - 4\vartheta_S^2/3)}{2(\vartheta_L^2 + 2\vartheta_S^2)} \quad (6)$$

Иссиқлик ўтказувчанлик, акустик тўлқинлар тезликлари бўйича олинган тажриба натижалари ва Грюнайзен параметрининг ҳисобланган қийматлари сўнишни (5) формула бўйича ҳисоблашда қўлланди. Қотишмаларда Ахиезер механизми бўйича ҳисобланган акустик тўлқинлар сўниши, кузатилган сўнишдан бир тартибга кам бўлиб чиқди, демак бу

механизмнинг кузатилган сўниш чўққисига хиссасини эътиборга олмаса ҳам бўлади.

САВ-1 қотишмада акустик сўниш мксимуми фақат 10 МГц частотада 335 K температурада кузатилади. Буни САВ-1 да 30 МГц частотада товуш сўнишининг катта қиймати билан тушинтирилади, мазкур холда сўнишга асосий хиссани структура зарраларида сочилиш эмас, балки 10 МГц частотада кузатиладиган сўнишнинг релаксацион механизмини босиб кетувчи зарралар чегараларидаги диффузион сочилиш беради. Шундай қилиб, қотишмаларда сўниш коэффицентининг максимумлари асосий легирловчи элементлар атомларининг акустик тўлқин таъсирида янги мувозанат ҳолатига ўтиши вақтидаги релаксацион жараёнларга боғлиқдир.

Диссертациянинг “САВ-1 ва АМГ-2 қотишмаларда эластиклик модуллари ва структура ўзгаришлари” номли учинчи бобнинг учинчи бўлимида ўртача Дебай тезлиги  $\vartheta_D$  ва барча эластиклик модуллари – Юнг модули  $E$ , силжиш модули  $G$ , ҳажмий эластиклик модули  $B$ , эластиклик тензори компонентлари  $c_{11}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{44}$  ва Пуассон коэффицентини ҳисоблаш натижалари қараб чиқилган. Ҳисоблаш натижалари 2-жадвалда келтирилган, унда соф алюминий ва АМГ-6 қотишма учун адабиётларда мавжуд маълумотлар ҳам келтирилган.

## 2-жадвал

### Алюминия ҳамда сплавов САВ-1, АМГ-2 ва АМГ-6 қотишмаларнинг эластиклик модуллари, $10^{10}$ Н/м<sup>2</sup> бирликларда

| Материал   | $\rho$ | $c_{11}$ | $c_{44}$ | $c_{12}$ | $B$  | $E$  | $G$  | $\sigma$ |
|------------|--------|----------|----------|----------|------|------|------|----------|
| Al         | 2.7    | 11.20    | 2.60     | 6.01     | 7.73 | 7.13 | 2.60 | 0.345    |
| САВ-1      | 2.69   | 9,62     | 2,34     | 4,94     | 6.50 | 6.32 | 2.34 | 0.337    |
| АМГ-2      | 2.68   | 10.17    | 2.44     | 5.29     | 6.91 | 6.56 | 2.44 | 0.342    |
| АМГ-6 [42] | 2.64   | 10.60    | 2.59     | 5.42     | 7.14 | 6.89 | 2.59 | 0.34     |

Алюминий қотишмаларининг деформациясини характерловчи эластиклик доимийлари уларни таркибларига сезиларли даражада боғлиқ бўлиши кўриниб турибди. Киритма элементлар, айниқса бўйлама ва ҳажмий деформацияларни характерловчи  $E$  ва  $B$  эластиклик модулларига кучли таъсир кўрсатади. 2-жадвалда Пуассон коэффиценти  $\sigma$  қийматлари ҳам келтирилган.

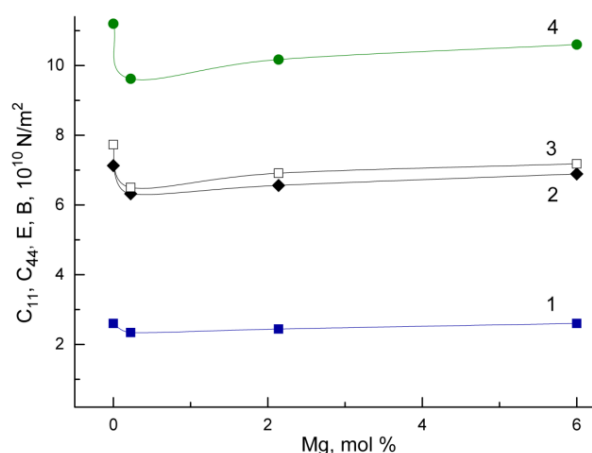
$$\sigma = \frac{0.5\vartheta_L^2 - \vartheta_S^2}{\vartheta_L^2 - \vartheta_S^2} \quad (7)$$

Қотишмалар учун Пуассон коэффиценти қийматлари унинг алюминий учун қийматларидан деярли фарқ қилмайди, назария бўйича ҳам металллар ва

уларнинг қотишмаларида Пуассон коэффициентининг қийматлари кам ўзгаради.

3-расмда САВ-1, АМГ-2 ва АМГ-6 қотишмаларда эластиклик коэффициентлари  $c_{11}$  ва  $c_{44}$ , Юнг модули  $E$  ва ҳажмий модул  $B$  ларнинг таркиблардаги киритма Mg ни эффектив концентрациясига боғлиқлиги келтирилган. Текширилган концентрациялар интервалида барча эластиклик модуллари учун нозичлиқли боғланиш кузатилиши кўриниб турибди. Бу магний ва кремний киритмаларининг кичик концентрацияларида уларнинг тугунлар орасига кириши ҳисобига вакансиялар концентрацияси ортиши, ғоваклар ҳосил бўлиши билан тушинтирилади.

Кейинчалик, қотишмада магний концентрациясининг ортиши билан қаттиқ эритмада яхши эрийдиган магний атомлари асосий рол ўйнай бошлайди. Таркибда магний миқдори ортиши билан кристалл панжара яна биржинслироқ бўла боради, атомлар орасидаги марказий кучлар яна ортади ва мос тарзда эластиклик модуллари ортади.



**3-расм. Қотишмаларда эластиклик коэффициентлари  $c_{44}$  (1),  $c_{11}$  (4), Юнг модули  $E$  (2) ва ҳажмий модул  $B$  (3) ларнинг киритма Mg концентрациясига боғлиқлиги**

Диссертациянинг “САВ-1 ва АМГ-2 қотишмаларнинг эластиклик ва иссиқлик хоссалари ва анизотропия параметрининг ўзаро боғлиқлиги” номли 3-бобнинг тўртинчи бўлими бошланишида САВ-1 ва АМГ-2 қотишмалар учун қуйидаги муносабатдан Дебай температурасини аниқлаш натижалари келтирилган:

$$\theta_D = \frac{h\omega_D}{2\pi k} \quad (8)$$

бу ерда  $k$  ва  $h$  — Больцман ва Планк доимийлари;  $\omega_D$  — кристалл панжара тебранишларининг максимал частотаси.

Бошқа ишлардан фарқли равишда, ҳисоблашларимизда бу қотишмалар учун акустик тўлқинлар тезлигининг биз олган қийматлари ишлатилди. САВ-

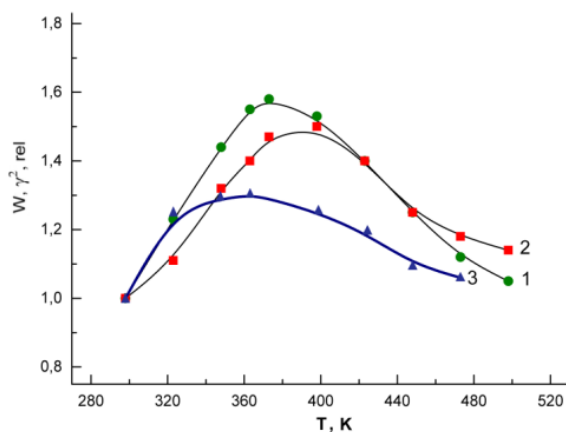


1 ва АМГ-2 қотишмалар учун Дебай температураси қийматлари мос равишда 406 K ва 409 K га тенг, яъни алюминий учун қиймат – 399 K дан юқори чиқди.

Айтиб ўтилганидек, Грюнайзен параметри  $\gamma$  атомлар тебранишларини характерлашга хизмат қилади, уни Беломестных В.Н. тегламасидан топиш мумкин, тенглама бўйлама ва кўндаланг акустик тўлқинлар тезликлари қийматларидан Грюнайзен параметрини топиш имконини беради:

$$\gamma = \frac{9(\vartheta_L^2 - 4\vartheta_S^2/3)}{2(\vartheta_L^2 + 2\vartheta_S^2)}, \quad (9)$$

4-расмда (8) муносабатдан ҳисобланган Грюнайзен параметри квадратининг ўзгариши ва бўйлама ва кўндаланг акустик тўлқинлар тезликларининг тажрибада топилган қийматлари кўрсатилган.



**4-расм. АМГ-2(2), САВ-1(1) қотишмаларда Грюнайзен параметри квадратининг (3) ва иссиқлик қаршилигининг температурага боғлиқлиги**

Айни пайтда акустик тўлқинлар сўниши  $\alpha$  ни материалнинг иссиқлик қаршилиги  $W$  га кўпайтмаси Грюнайзен доимийси билан қуйидагича боғланган:

$$\alpha = \gamma^2 \frac{T\omega^2}{c_{eff}' W \vartheta_D^2} \quad (10)$$

бу ерда  $\vartheta_D$ —иссиқлик фононларининг Дебай тезлиги.

4-расмдан САВ-1 ва АМГ-2 қотишмаларда иссиқлик ўтказувчанлик коэффициентининг аномал табиатини тушинтириб берувчи температурага боғланишларнинг сифат мувофиқликлари кўриниб турибди.

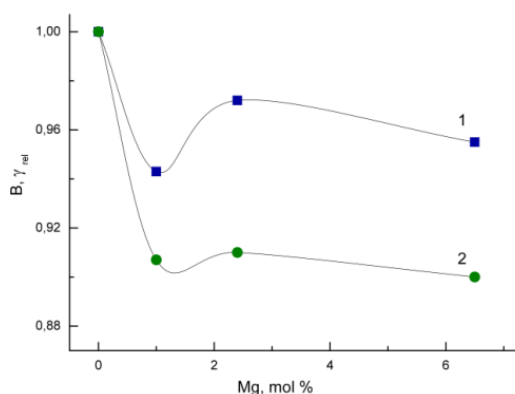
Диссертациянинг “Алюминий қотишмаларида ангармонизм параметрининг акустик тўлқин тезликлари ва ҳажмий эластиклик билан боғлиқлиги” номли 3-бобнинг бешинчи бўлимида, агар  $\vartheta_L$  ва  $\vartheta_S$  ни Юнг модули  $E$ , модда зичлиги  $\rho$  ва Пуассон коэффициенти  $\sigma$  билан боғловчи

маълум формулалардан фойдаланилса, Грюнайзен параметри учун Пуассон коэффиценти билан оддий боғланишни олиш мумкин (бундай ҳолда Грюнайзен эластиклик коэффиценти деб аталади)

$$\gamma_{\text{ур}} = \frac{3(1 + \sigma)}{2(2 - 3\sigma)} \quad (11)$$

(10) ифодани таҳлил қилиш, Пуассон коэффицентининг реал поликристаллар учун 0.05 дан 0.46 гача қийматларида Грюнайзен параметри 0.85–3.53 оралиқда бўлади, бу эса кўпчилик тажриба натижаларига мос келишини кўрсатади.

5-расмда Al–Mg қотишмалар учун ҳажмий эластиклик модули  $B$  ва ангармонизм доимийсининг киритма Mg концентрациясига боғлиқлиги келтирилган.



**5-расм. Al–Mg қотишмалар учун ангармонизм доимийси (1) ва ҳажмий эластиклик модули  $B$ (2) нинг Mg концентрациясига нисбий боғлиқлиги**

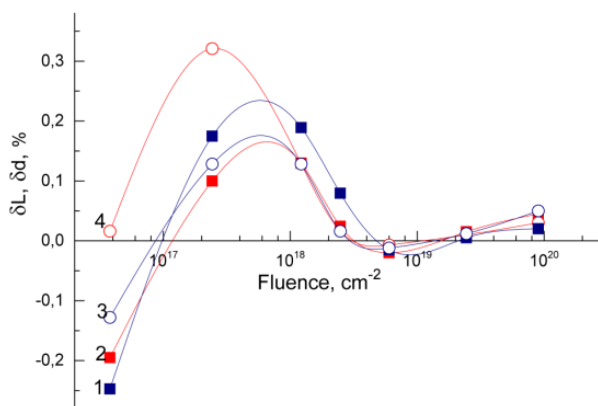
Киритма Mg ҳажмий эластиклик модулига ҳам, ангармонизм доимийсига ҳам бир хил таъсир қилиши кўриниб турибди. Бундан Mg кам концентрацияларда қотишма кристалл панжарасини ғовакроқ қилиши ва атомлар орасидаги таъсир кучларини сусайтириши келиб чиқади. Натижада ангармонизм доимийси ва ҳажмий эластиклик модули камаяди. Кейинроқ, магний концентрацияси ортиб бориши билан бу атомлар вакнсияларни тўлдиради, панжарада “вакансион ғоваклик” камаяди, атомлар орасида боғланиш кучлари яна ортади ва мос равишда структурага сезгир параметр бўлгани учун алюминий қотишмаларида чизиқли ва ночизиқли эластиклик хоссаларини боғловчи параметр бўлиб хизмат қилиши мумкин.

Диссертациянинг “АМГ-2 ва САВ-1 қотишмаларнинг панжара параметрилари ва эластиклик хоссаларига нейтрон нурланишининг таъсири” деб номланган тўртинчи бобида намуналарнинг нурланишгача ва нурланишдан кейинги асосий характеристикалари келтирилган. Ўрганилган САВ-1 ва АМГ-2 қотишмалари қиррага марказлашган кубик тузилишга эга, панжара параметри, мос равишда САВ-1 учун  $a=4,066\text{\AA}$ , АМГ-2 учун  $a=4,072\text{\AA}$ .

Бу қотишмалардаги деформацияга нейтрон нурланишнинг таъсири тадқиқ қилинди. Уларда асосий киритмалар магний, марганец ва кремний. Назорат қилиб бўлмайдиган киритмалар (Ni, Cu, Fe, Zn ва б.) жами 0.5 масс. % дан кўп эмас. Нурлантиришгача киритмалар қотишманинг бутун ҳажми бўйича нотекис тақсимланган ва оқ доғлар кўринишидаги эримайдиган, ўлчамлари  $1\div 10$  мкм, Al-Mg-Si-Fe системани интерметалл фазаларини ҳосил қилади.  $10^{18}$  см<sup>-2</sup> флюенс билан нурлантирилгандан кейин Al-Mg-Si-Fe системани интерметалл фазаларининг ўлчамлари 1-4 мкм дан катта бўлмайди,  $\sim 10^{19}$  см<sup>-2</sup> флюенсдан кейин эса  $0,5\div 1,5$  мкм.

4-бобнинг иккинчи бўлимида алюминий қотишмаларининг радиация таъсирида шишиши кўриб чиқилган. Энг муҳим радиацион эффектларга нурлантириш натижасида деталлар ўлчамларининг ўзгариши, қийшайиши, ёрилиши ва бузилиши билан бирга кечадиган конструкцион материаллар деформацияси киради.  $\alpha$ -зарралар ва протонларга нисбатан катта чуқурликка кириб боргани учун, нейтронлар солиштириб бўлмайдиган даражада кўп структура бузилишлари ҳосил қилади. Айни вақтда нейтронлар билан нурлантирилганда вакансион ғовақлар пайдо бўлади ва ўсиб боради, бу эса қотишманинг шишишига олиб келади.

САВ-1 ва АМГ-2 қотишмаларнинг тўғри цилиндр шаклли, баландлиги 20 мм, диаметри 15 мм, намуналарининг чизикли ва ҳажмий деформацияларига нейтронлар билан нурлантириш таъсири синчиклаб тадқиқ қилинди. Чизикли ўлчамлар 1 мкм аниқликда микрометрда ўлчанди. Намуналарнинг чизикли ўлчамлари ўзгариши  $3.8\cdot 10^{16}$  дан  $9.1\cdot 10^{19}$  н/см<sup>2</sup> гача флюенслар оралиғида нейтронлар интеграл оқими таъсиридан кейин аниқланди. САВ-1 ва АМГ-2 қотишмалар учун кузатилган ўзгаришлар сифат жиҳатдан бир хил экани кўринди: аввалига  $1.55\cdot 10^{17}$  н/см<sup>2</sup> флюенсда ўлчамлар қисқариши кузатилади, кейин нурлантириш дозаси  $1.55\cdot 10^{17}$  дан  $1.1\cdot 10^{18}$  н/см<sup>2</sup> гача ортиб борганда чўзилиш деформацияси юзага келади. Нурлантириш дозасини янада оширилганда чизикли ўлчамларнинг тескари томонга ўзгариши (сиқилиш) юз беради.



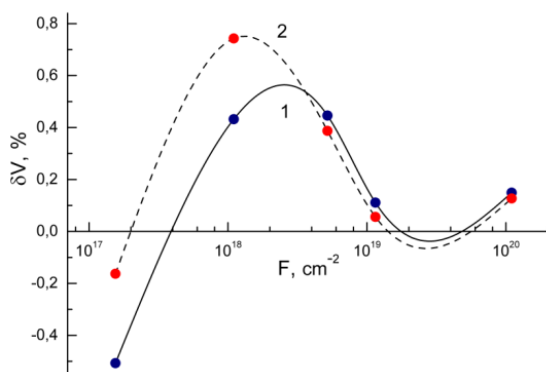
**6-расм. САВ-1 (1, 3) ва АМГ-2 (2, 4) цилиндрик намуналари узунлиги (1, 2) ва диаметри (3, 4) нинг нейтронлар флюенсига боғлиқ нисбий ўзгариши**

Флюенс қиймати  $1.2 \cdot 10^{19}$  н/см<sup>2</sup> га етганда чизикли ўлчамлар деярли дастлабки ҳолатга қайтади. Олинган натижалар нейтронлар билан нурлантириш таъсирида намуналар ҳажмининг нисбий ўзгариши  $\Delta V/V_0$  ни аниқлаш имконини беради. Ҳисоблаш цилинрик жисмлар ҳажми учун математик формуладан осон келтириб чиқариладиган муносабатни қўллаб бажарилди:

$$\Delta V/V_0 = [(1+A) \cdot (1+B)^2 - 1] \quad (12)$$

бу ерда  $A = \Delta L/L_0$  – намуна узунлиги  $L$  нинг нисбий ўзгариши,  $B = \Delta d/d_0$  – намуна диаметри  $d$  нинг нисбий ўзгариши.

САВ-1 ва АМГ-2 қотишмалар учун ҳисоблаш натижалари 7-расмда келтирилган. Кичик дозаларда нейтронлар билан нурлантиришда деярли 1% шишиш кузатилиши кўринади. Нурлантириш дозаси ортиб бориши билан, намуна ҳажми камайди ва доза қиймати  $1.2 \cdot 10^{19}$  н/см<sup>2</sup> га етганда деярли дастлабки ҳажмга қайтади.



**7-расм. САВ-1 (1) ва АМГ-2 (2) қотишмалар намуналар ҳажми нисбий ўзгаришларининг нейтронлар флюенсига боғланиши**

Назарияга кўра, ғовакларнинг ўлчамлар бўйича тақсимланиши Гаусс тақсимоти қонунига бўйсунди ва нурлантирилаётган материалдаги ортикча вакансиялар тизими барқарорлигининг бузилиши натижасида ғоваклар пайдо бўлишига боғлиқ. Ғовак радиуси ортиб борганда ғовакка келаётган вакансия оқими ғовак сирт юзаси катталашгани учун ортади, бу ғовак яқинида вакансиялар концентрациясини камайтириб, мос равишда вакансиялар концентрацияси градиентини орттиради. Натижада, нейтронларнинг нисбатан кичик флюенсларида ғоваклар радиусининг янада ортиши ва мос тарзда қотишманинг шишиши юз беради. Шу билан бирга, эркин энергияни минималлаш шарти бўйича ғовакнинг чегаравий қатламида турли томонларда босим фарқи юзага келади ва тугунлардаги ва тугунларо жойлашган атомлар ҳосил қиладиган босимга қаршилик қиладиган сирт таранглиги сабабли пайдо бўладиган қўшимча босим  $\Delta P$  ҳисобига динамик мувозанат таъминланади. Бу қўшимча босим Лаплас формуласи билан ифодаланади ва муайян нуқтадаги сирт эгрилигига ва сирттаранглиги

коэффициентига боғлиқ бўлади.  $R$  радиусли сферик ғовак учун формула қуйидагича ёзилади:

$$\Delta P = \frac{2 \cdot \gamma}{R} \quad (13)$$

(13) формулага мувофиқ, ғовак ўлчами ортиши билан, қўшимча босим  $\Delta P$  камаяди ва муайян критик радиусга етганда йирик ғоваклар бир қатор кичикроқ кластерларга бўлинади. Натижада нейтронларнинг катта дозалари билан нурлантирилгандан кейин қотишмаларда йирик ғовакларнинг ҳажмий хиссаси камийиб, кичикроқ ўлчамли ғоваклар хиссаси ортади, яъни йирик вакансион ғовакларнинг кичикроқ ғовакларга фрагментацияланиши юз беради.

Диссертациянинг “Алюминий қотишмаларида нейтрон нурланишининг панжара параметрига таъсири” номли 4-бобнинг 3-бўлимида САВ-1 ва АМГ-2 қотишмаларда панжара параметрининг ўзгаришига нурланишнинг таъсирини нейтронлар флюенсининг кенг диапазонида ўрганиш натижалари келтирилган. Намуналарнинг зичлиги аввалдан аналитик тарозиларда гидростатик ўлчаш орқали 0.2% аниқликда топилди. Намуналар чизиқли ўлчамларининг ўзгариши  $3.8 \cdot 10^{16}$  дан  $9.1 \cdot 10^{19}$  н/см<sup>2</sup> гача диапазонда нейтронлар интеграл оқими таъсиридан кейин аниқланди.

САВ-1 ва АМГ-2 қотишмалар оралиқ каттик эритма типига шаклланади, уларда асосий легирловчи элементлар кремний ва магний атомлари кристалл структуранинг оралиқлари (тугунлар ораси) да жойлашади ва қотишма асосининг кристалл структурасидан локал четланишларга олиб келади. Натижада, бундай ячейкалар хиссаси нисбатан камлигига қарамай, элементар ҳажмнинг сезиларли ортишига ва оралиқ қотишма панжараси ўртача даврининг сезиларли даражада ортишига олиб келади. Юқорида айтиб ўтилганидек, нурлантирилмаган САВ-1 ва АМГ-2 қотишмалар намуналарининг панжара параметрлари, мос тарзда 0,4066 нм ва 0.4071 нм га тенг ва соф алюминийнинг панжара параметри 0.4049 нм [4] дан катта.

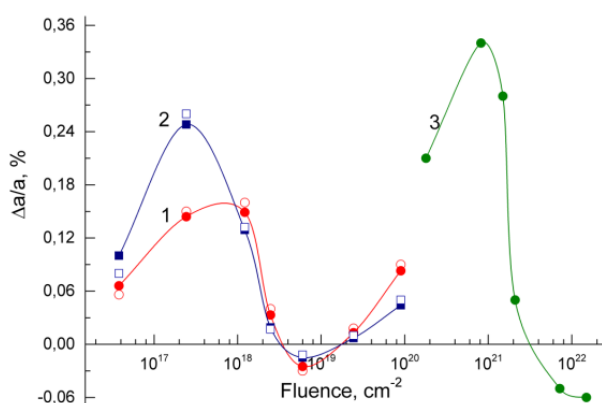
Олинган натижалар нейтронлар нурланиши таъсирида намуналар ҳажмининг нисбий ўзгариши  $\delta V$  ни (11) муносабатдан аниқлаш имконини беради. Бу ўзгаришни ўртачаланган панжара параметрининг ўзгариши орқали ифодаласа ҳам бўлади. Агар, қиррага марказланган панжарага эгалигини ва бирлик ҳажмдаги ячейкалар сони  $N_c$  шубҳасиз Авагадро сони  $N_A$  орқали топилишини ҳисобга олсак, бирлик ҳажмни битта кубик ячейка ҳажми орқали қуйидаги муносабатга кўра ифодалашимиз мумкин:

$$V_0 = N_c a^3 = \frac{1}{4} \frac{\rho}{\mu} N_A a^3 \quad (14)$$

Нейтрон нурланиши таъсирида панжара параметрининг нисбий ўзгариши етарлича юқори аниқликда намуналар ҳажмининг нисбий ўзгариши орқали аниқланишини осонгина кўрсатиб бериш мумкин:

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{1}{3} \frac{\Delta V}{V_0} \quad (15)$$

САВ-1 ва АМГ-2 қотишмаларда панжара параметрлари ўзгаришларини ҳисоблаш натижалари ва молибден учун адабиёт маълумотлари 8-расмда кўрсатилган. Қотишмаларнинг иккитадан намуналари тадқиқ қилинганига эътибор қаратамиз. Расмда бу мос равишда оч ва тўқ рангли нуқталарда ифодаланган. Айни бир қотишманинг ҳар иккала намунаси учун ўлчаш натижаларини яхши мос тушиши олинган натижаларнинг тўғрилиги ва ишончилигини тасдиқлайди. Кўриниб турибди-ки, ҳажмга марказлашган панжарага эга молибден билан солиштирилганда, қиррага марказлашган кристалл панжарали қотишмаларда боғланишларнинг кичикроқ дозалар соҳасига икки барабар силжиши юз беради.



**8-расм. САВ-1 (1), АМГ-2 (2) қотишмалар ва молибденда нейтронлар билан нурлантириш таъсирида панжара параметрининг ўзгариши**

Бундай силжиш қиррага марказлашган кристалл панжарали материалларда вакансион кластерланиш чегарасининг кичикроқ дозалар томон силжишини аниқлаган бошқа тадқиқотларда ҳам кузатилган. САВ-1 ва АМГ-2 қотишмаларда кузатилган панжара параметрининг радиация таъсирида ўзгариши ўзаро рақобатлашувчи иккита механизм ва тугунлараро жойлашган атомлар ва ғоваклар концентрацияси динамикасининг уларнинг ҳажмида нейтронлар билан нурлантириш дозаларига боғлиқ ўзгариши билан тушинтирилади.

## ХУЛОСА

“Алюминий қотишмаларида чизикли ва ночизикли эластик ва иссиқлик хоссаларининг ўзаро боғлиқлиги” мавзусидаги фалсафа доктори (PhD) диссертация ишининг натижалари асосида қуйидаги хулосалар келтирилади:

1. Қўйилган вазифаларни бажариш учун Вильямс-Лэмб усули асосида материалларда акустик тўлқинларнинг тезлиги ва сўнишини прецизион ўлчаш учун қурилма ишлаб чиқилди.

2. Биринчи марта САВ-1 ва АМГ-2 қотишмаларда бўйлама ва кўндаланг акустик тўлқинлар тезлиги ва сўниш коэффициентлари частота ва температурага боғлиқ равишда тажрибада аниқланди.

3. САВ-1 ва АМГ-2 қотишмалар намуналарида, 10 ва 30 МГц частоталарда, бўйлама акустик тўлқинлар сўниши коэффициентининг температурага боғланишида релаксацион типдаги сўниш максимумлари топилди.

4. Биринчи марта акустик усулда, САВ-1 ва АМГ-2 қотишмаларда Грюнайзен параметри аниқланди ва бу қотишмаларда ангармонизм константаси билан иссиқлик қаршилиги коэффициентининг температурага боғланишлари сифат жиҳатдан мувофиқлиги кўрсатиб берилди.

5. Эластиклик модулларининг, шу жумладан Юнг модули, силжиш модули ва ҳажмий эластикликнинг адиабатик модули алюминий қотишмалари таркибидаги магний киритмаси концентрациясига боғлиқлиги аниқланди.

6. Асосий легирловчи киритмалар Mg ва Si эластикликнинг ҳажмий модули  $B$  га ва ангармонизм доимийсига амалда бир хил таъсир қилиши аниқланди. Шундай қилиб, Грюнайзен параметри алюминий қотишмаларининг чизикли ва ночизикли эластиклик ва иссиқлик хоссаларини боғловчи характеристика бўлиб хизмат қилиши мумкин.

7. Нейтронлар билан нурлантирилган САВ-1 ва АМГ-2 қотишмаларда уларнинг ҳажмида тугунлараро жойлашган атомлар ва вакансион ғовақлар концентрациясининг нурлантириш дозалари бўйича ўзгаришлари динамикаси билан боғланган панжара параметрининг ночизикли ўзгариши топилди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

---

**ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

**БОЛТАБАЕВ АЗИЗБЕК ФАРХОДОВИЧ**

**ВЗАИМОСВЯЗЬ ЛИНЕЙНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ УПРУГИХ И  
ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ В АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ**

**01.04.07 – Физика конденсированного состояния**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам**

**Ташкент – 2021**



**Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером № B2021.3.PhD/FM637**

Диссертация выполнена в Институте ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета ([www.inp.uz](http://www.inp.uz)) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)).

**Научный руководитель:** **Ахмеджанов Фархад Рашидович**  
доктор физико-математических наук, доцент

**Официальные оппоненты:** **Ашуров Мухсин Хуррамович**  
доктор физико-математических наук, профессор, академик  
**Мирзаев Сирожиддин Зайниевич**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Ведущая организация:** **Ташкентский государственный технический университета имени И.А. Каримова**

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 года в \_\_\_\_ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики (Адрес: 100214, г. Ташкент, поселок Улугбек, ИЯФ; тел.: (+998) 71-289-31-18; факс: (+998) 71-289-36-65; e-mail: [info@inp.uz](mailto:info@inp.uz)).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ядерной физики (регистрационный № \_\_\_\_\_). Адрес: 100214, г. Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ. Тел. (+99871) 289–31–19).

Автореферат диссертации разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.  
(протокол рассылки № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2021 г.)

**М.Ю. Ташметов**  
председатель Научного совета по присуждению  
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

**О.Р. Тожибоев**  
ученый секретарь Научного совета по присуждению  
ученых степеней, PhD.ф.-м.н

**С.В. Артёмов**  
зам председатель научного семинара при  
Научном совете по присуждению ученых степеней,  
д.ф.-м.н., профессор

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире в последние годы проявляемый интерес к исследованию взаимосвязи между линейными и нелинейными упругими и тепловыми свойствами твердых тел обусловлен тем, что нелинейные свойства являются не только более чувствительными к происходящим из-за внешних воздействий структурным изменениям в материале, но часто определяют изменение и линейных упругих свойств. Одним из основных параметров, характеризующих упругую нелинейность, является параметр Грюнайзена (константа ангармонизма), который определяется изменением частоты нормальных мод колебаний решетки в зависимости от изменения объема системы. Обычно он вычисляется по уравнению Грюнайзена из данных о коэффициенте объемного теплового расширения, изотермическом модуле объемного сжатия, молярном объеме и молярной теплоемкости. Выявление новых методов определения константы ангармонизма и установление однозначных связей между параметром Грюнайзена, характеризующим нелинейность сил межатомного взаимодействия, и известными параметрами линейной теории упругости, несомненно, представляет научный и практический интерес и является актуальной задачей.

Сегодня во многих странах мира проводятся исследования нелинейных физических свойств различных материалов, в том числе нелинейных упругих и тепловых свойств металлических сплавов. Принципиально упругая нелинейность конденсированных сред и нелинейные тепловые свойства связаны через ангармонизм межатомного взаимодействия. При этом параметр Грюнайзена, который входит в уравнение состояния, отражает особенности фононного спектра кристалла и определяет целый ряд важных упругих и тепловых физических характеристик. В их числе, как нелинейные (тепловое расширение, теплопроводность, поглощение звуковых волн, температурная зависимость упругих свойств), так и линейные характеристики, такие как удельная теплоемкость, модуль всестороннего сжатия, сжимаемость.

В последние годы в Республике Узбекистан также уделяется большое внимание фундаментальным исследованиям в области материаловедения – поиску новых материалов и изучению свойств уже известных материалов, включая свойства металлов и металлических сплавов, используемых в качестве конструкционных материалов в различных отраслях экономики страны. Направления этих фундаментальных исследований, имеющих большое значение для развития науки и практического применения в атомной энергетике нашей страны, отражены в Стратегии<sup>2</sup> действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 гг., а также в

---

<sup>2</sup> Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 07 февраля 2017 г.

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 Указах Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 2 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 гг.», № УП-4958 от 16 февраля 2017 года «О дальнейшем совершенствовании системы послевузовского образования, № ПП-2789 от 17 февраля 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности», а также в других нормативно-правовых документах.

**Соответствие исследования основным приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** 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.** К настоящему времени учеными во многих странах мира, в том числе американскими (Y.S. Kim, A. Yacout), российскими (К.А. Коноплев, С.Р. Фридман, С.П. Орлов, В.М. Лебедев, С.Н. Вотинов), казахстанскими (О.П. Максимкин, А.В. Яровчук, Л.Г. Турубарова), польскими (В. Штеке, Т. Вагнер, Е. Хаевска), израильскими (А. Minitz, A. Shtechman), украинскими (В.Н.Воеводин и др.), узбекистанскими (Салихбаев У.С., Хидиров И., Байтелесов С.А., Аликулов Ш.А., Ахмеджанов Ф.Р. и др.) и другими специалистами выполнен большой объем работ по экспериментальным и теоретическим исследованиям свойств алюминиевых сплавов САВ-1 и АМГ-2.

В результате проведения исследований выявлено влияние нейтронного облучения на коррозионную стойкость САВ-1 после эксплуатации в активной зоне реактора ВВР-К, а также на микроструктуру и свойства сплавов системы Al–Mg–Si; определена радиационная стойкость сплава САВ-1; изучена наноразмерная структура сплава САВ-1, облученного быстрыми нейтронами до высоких значений флюенсов; выявлено влияние реакторного облучения на микроструктуру и микротвердость алюминиевых сплавов САВ-1 и АМГ-2, определены электропроводность и теплопроводность этих сплавов.

Однако упругие свойства алюминиевых сплавов изучены слабо, а имеющиеся данные являются противоречивыми. Между тем, скорость распространения и затухания акустической волны напрямую функционально связана с упругими константами, величина которых, в свою очередь, сильно зависит от состава и структуры сплавов. Установление соотношений между линейными и нелинейными упругими и тепловыми свойствами сплавов позволит более достоверно оценивать структурные изменения, происходящие из-за внешних воздействий. И одной из актуальных задач является

определение основной характеристики нелинейности - параметра Грюнайзена (константы ангармонизма) из минимального количества экспериментально измеряемых величин.

**Связь темы диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационная работа выполнялась в рамках научно-исследовательского проекта Института ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан по теме: ФА-АЗ-Ф004 «Разработка методов обеспечения ядерной и радиационной безопасности при выводе из эксплуатации ядерного реактора ВВР-СМ ИЯФ АН РУ» (2015-2017).

**Целью исследования** является определение взаимосвязанности линейных и нелинейных упругих и тепловых свойств алюминиевых сплавов, в зависимости от содержания примесей.

**Задачи исследования:**

определить скорость и затухание акустических волн в алюминиевых сплавах САВ-1 и АМГ-2 в зависимости от концентрации примесей и от температуры;

определить энергию активации движения атомов примесей в алюминиевых сплавах АМГ-2;

на основе экспериментальных результатов определить значения параметра Грюнайзена и всех упругих констант алюминиевых сплавов САВ-1 и АМГ-2;

установить влияние нейтронного излучения на динамику изменения параметра решетки сплавов САВ-1 и АМГ-2.

**Объектом исследования** являются линейные и нелинейные упругие и тепловые свойства алюминиевых сплавов САВ-1 и АМГ-2.

**Предметом исследования** являются скорость распространения и коэффициент затухания акустических волн, коэффициент теплопроводности и параметр решетки алюминиевых сплавов САВ-1 и АМГ-2.

**Методы исследования.** Импульсный и импульсно-интерференционный методы измерения скорости и коэффициента затухания акустических волн в материалах.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

впервые экспериментально определены скорости и коэффициенты затухания как продольных, так и поперечных акустических волн в алюминиевых сплавах САВ-1 и АМГ-2 на ультразвуковых частотах в диапазоне частот от 10 до 50 МГц;

определены энергия активации движения атомов магния в решетке сплава АМГ-2, равная 0,38 эВ и усредненная частота колебаний атомов магния в позиции внедрения, равная  $\sim 3 \cdot 10^{12}$  Гц;

впервые определен параметр Грюнайзена в алюминиевых сплавах САВ-1 и АМГ-2, равный, соответственно, 2.04 и 2.06, а также его зависимость от температуры;

определена зависимость упругих постоянных, в том числе модуля сдвига  $G$ , модуля Юнга  $E$ , адиабатического модуля объемной упругости  $B$ , от эффективной концентрации примесей магния (0,45 – 2,10 %) в составе алюминиевых сплавов САВ-1 и АМГ-2;

разработано устройство по определению скорости и затухания акустических волн в материалах и модернизирован импульсный интерференционный метод, что позволило повысить точность определения этих параметров.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

показана эффективность акустических методов контроля изменения структуры и упругих свойств алюминиевых сплавов, применяемых в качестве конструкционных материалов в ядерных реакторах;

показано, что обнаруженное радиационное изменение параметра решетки в сплавах САВ-1 и АМГ-2 обусловлено двумя конкурирующими механизмами и соответствующей зависимостью концентрации междоузельных атомов и вакансионных пор в их объеме от дозы нейтронного облучения.

**Достоверность результатов исследования** обуславливается физической обоснованностью поставленных задач, использованием хорошо апробированных современных методов исследования упругих и тепловых свойств металлических сплавов, большим объемом экспериментальных результатов и их согласованностью с фундаментальными законами и основными положениями физики конденсированного состояния, непротиворечивостью полученных результатов и выводов с некоторыми результатами других авторов.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость результатов заключается в установлении зависимости упругих модулей от эффективной концентрации примесей магния и кремния в составе сплавов САВ-1 АМГ-2, которая изменяется под действием нейтронного излучения.

Практическое значение результатов заключается в возможности прогнозирования упругих свойств исследованных сплавов и целенаправленного управления свойствами конструкционных материалов, разрабатываемых на основе алюминиевых сплавов.

**Внедрение результатов исследования.** На основе полученных результатов по определению взаимосвязанности линейных и нелинейных упругих и тепловых свойств алюминиевых сплавов:

определенные скорости и коэффициенты затухания как продольных, так и поперечных акустических волн в алюминиевых сплавах САВ-1 и АМГ-2, а также энергия активации движения атомов магния в решетке сплава АМГ-2 использованы на уникальном научном объекте «Исследовательский ядерный реактор ВВР-СМ» (Письмо АН РУз № 2/1255-2320 от 20.08.2021 г.). Использование научных результатов позволило провести расчеты температурного режима работы реактора ВВР-СМ;

определенный параметр Грюнайзена и его зависимость от температуры в алюминиевых сплавах САВ-1 и АМГ-2 использованы на уникальном научном объекте «Исследовательский ядерный реактор ВВР-СМ» (Письмо АН РУз № 2/1255-2320 от 20.08.2021 г.). Использование научных результатов позволило прогнозировать зависимость коэффициентов теплопроводности и теплового сопротивления в этих сплавах от температуры;

зависимость упругих модулей от эффективной концентрации примесей магния в составе алюминиевых сплавов использована в рамках фундаментального проекта БФ2-006 «Минимизация активности продуктов деления и трансурановых изотопов и исследование их воздействия на конструкционные материалы ядерного реактора ВВР-СМ ИЯФ АН РУ». (Письмо АН РУз № 2/1255-2320 от 20.08.2021 г.). Использование научных результатов позволило оценить степень распухания сплава САВ-1, применяемого в качестве конструкционного материала в ТВЭЛ ядерного реактора ВВР-СМ ИЯФ АН РУ в зависимости от дозы облучения;

разработанный импульсный интерференционный метод измерения скорости и затухания акустических волн, как устройство для прецизионного определения скорости акустических волн в материалах, зарегистрирован в Агентстве по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан (патент РУз на полезную модель № FAP 01545, от 28.09.2020 г.). Использование данной разработки позволило определить механические напряжения, возникающие в модулях, изготовленных из сплава САВ-1, и работающих в активной зоне ядерного реактора ВВР-СМ АН РУ.

**Апробация результатов исследования.** Результаты исследований докладывались на 11 Международных и республиканских научно-практических конференциях.

**Опубликованность результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, в том числе 1 патент на полезную модель, 8 научных статей в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций, 1 из них в зарубежном научном журнале.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 106 страниц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в Республике, рассмотрена степень изученности проблемы, сформулированы цель и задачи исследования. Выявлены также объект, предмет и методы исследования, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая

значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе **«Краткая теория акустических волн в твердых телах и обзор работ по дефектам и упругим свойствам алюминиевых сплавов»** представлена краткая теория акустических волн в твердых телах и обзор работ по дефектам и упругим свойствам алюминиевых сплавов. Особое внимание уделено коэффициенту затухания акустической волны, который характеризует ослабление амплитуды волны в результате ее взаимодействия со средой и рассеяния на неоднородностях.

Отдельный раздел первой главы посвящен основным типам дефектов в кристаллической структуре и их классификации. Рассмотрены основные процессы, которые отвечают за изменение физико-механических характеристик материалов, в первую очередь, из-за смещения атомов кристаллической решетки под действием нейтронного излучения.

Основное внимание в главе уделено обзору работ по упругим свойствам алюминиевых сплавов САВ-1 и АМГ-2 и родственному им сплаву АМГ-6. Рассмотрены работы, в которых изучались линейные и нелинейные упругие свойства алюминиевых сплавов с различным содержанием примесей. Показано, что в сплавах алюминия нелинейные константы более чувствительны к химическому составу и структуре материала.

Из проведенного обзора делается вывод, что, несмотря на имеющиеся работы и большой объем информации об упругих свойствах сплавов, многие вопросы поведения алюминиевых сплавов в области упругих деформаций остаются неизученными.

Во второй главе **«Образцы и экспериментальные методы»** приводятся данные о способах обработки и характеристиках исследованных образцов САВ-1 и АМГ-2. Отдельный раздел посвящен разработанному устройству прецизионного определения скорости и затухания акустических волн методом «импульсной интерференции» Вильямса–Лэмба. Особенностью устройства является амплитудный селектор, который открывается в определенный промежуток времени – временное окно пропускания. Это позволяет пропускать тот или иной импульс в серии и, измеряя амплитуды соседних импульсов  $A_1$  и  $A_2$  определять коэффициент затухания акустических волн  $\alpha$  из соотношения:

$$\alpha = \frac{20 \lg\left(\frac{A_1}{A_2}\right)}{2L} \quad (1)$$

где  $L$  – длина образца

Во-вторых, измерительная система формирует две серии акустических импульсов при помощи двух строб импульсов. Суммарная амплитуда при наложении этих импульсов зависит от разности фаз между заполняющими эти импульсы колебаниями, которую можно изменять, регулируя частоту

СВЧ генератора. При этом наблюдается ряд интерференционных нулей или максимумов амплитуды сигнала, положение которых на частотной шкале зависит от длины образца  $L$  и скорости акустической волны в нем:

$$\vartheta = 2L \cdot \Delta\nu \quad (2)$$

где  $\Delta\nu$  – разность двух частот генератора, соответствующих противофазной интерференции. Точность измерения скорости повышена за счет амплитудной и временной селекции полезного сигнала, и составляет  $\sim 0,01\%$ .

Коэффициент теплопроводности исследованных сплавов определялся методом динамического калориметра на установке ИТ- $\lambda$ -400. Облучение образцов сплавов производилось в вертикальном канале ядерного реактора ВВР-СМ ИЯФ АН РУз. В результате облучения были получены образцы сплавов с различными дозами флюенса нейтронов начиная от  $3,8 \cdot 10^{16}$  н/см<sup>2</sup> до  $0,9 \cdot 10^{20}$  н/см<sup>2</sup>.

В третьей главе «Упругие линейные и нелинейные свойства алюминиевых сплавов» приведены результаты измерения скорости и затухания акустических волн в сплавах САВ-1 и АМГ-2 и литературные значения для алюминия и сплава АМГ-6 (табл. 1). Частотные зависимости коэффициента затухания продольных акустических волн в сплавах САВ-1 и АМГ-2 приведены на рис. 1. Видно, что на низких частотах имеет место линейная частотная зависимость и квадратичная на частотах выше 30 МГц.

**Таблица 1**

**Скорость и коэффициент затухания акустических волн в Al и в сплавах САВ-1, АМГ-2, АМГ-6**

| Сплав     | $\vartheta_L$ ,<br>10 <sup>3</sup> м/с | $\vartheta_S$ ,<br>10 <sup>3</sup> м/с | $\vartheta_L / \vartheta_S$ | $\alpha_L$ , дБ/см |         | $\alpha_S$ ,<br>дБ/см | Средняя<br>скорость<br>10 <sup>3</sup> м/с |
|-----------|----------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------|--------------------|---------|-----------------------|--------------------------------------------|
|           |                                        |                                        |                             | 10 МГц             | 30 МГц  | 10 МГц                |                                            |
| Al [л]    | 6.44                                   | 3.10                                   | 2.08                        | 0.26-0.4           | 0.9-1.3 | 2.2                   | 4.4979                                     |
| САВ-1     | 5.98                                   | 2.95                                   | 2.03                        | 0.65               | 1.5     | 2.51                  | 4.2097                                     |
| АМГ-2     | 6.16                                   | 3.02                                   | 2.04                        | 0.52               | 1.3     | 2.66                  | 4.3277                                     |
| АМГ-6 [л] | 6.34                                   | 3.14                                   | 2.02                        |                    |         |                       | 4.4689                                     |

Согласно теории линейная зависимость затухания звука от частоты  $\nu$ , нарушается при повышении частоты, начиная с частот:

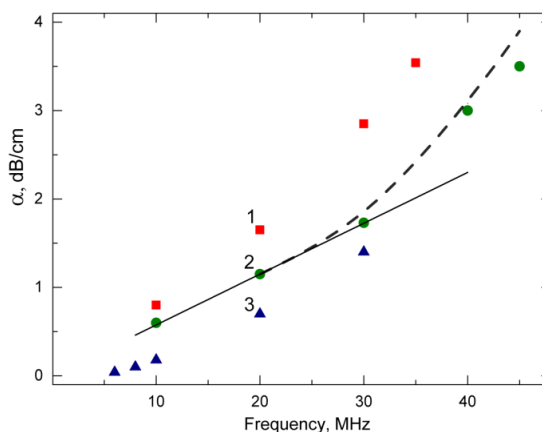
$$\nu \geq \frac{\vartheta}{20d} \quad (3)$$

где  $\vartheta$  – скорость акустической волны,  $d$  – средний размер кристаллитов.

Обусловлено это тем, что основной вклад в затухание звука дают потери энергии из-за рассеяния акустических волн на кристаллических зернах и



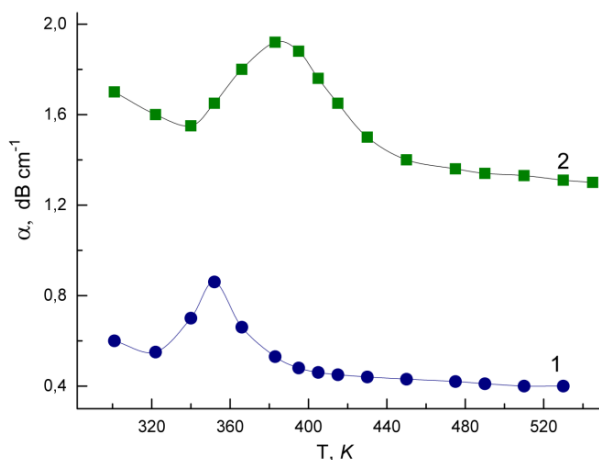
коэффициент затухания на низких частотах сильно зависит от размеров этих зерен. По частотной зависимости затухания и соотношению (3) можно оценить средний размер кристаллитов в сплаве. Оценка дает значения размеров кристаллитов: 10-15 мкм для сплава АМГ-2 и 30-40 мкм для сплава САВ-1, что совпадает с оценками, имеющимися в литературе. Таким образом величина акустического затухания существенным образом зависит от соотношения между длиной волны и размерами кристаллических зерен.



Прямая линия и штриховая кривая проведены в предположении линейной и квадратичной зависимости затухания от частоты, соответственно.

**Рис. 1. Частотная зависимость затухания продольных акустических волн в сплавах САВ-1 (1), АМГ-2 (2), и АИ (3)**

Во втором разделе главы 3 «Температурная зависимость затухания ультразвуковых волн в алюминиевых сплавах» представлены результаты исследования температурной зависимости затухания акустических волн в сплавах АМГ-2 и САВ-1 на частотах 10 и 30 МГц (рис. 2). Видно, что на обеих частотах наблюдается максимум в температурной зависимости затухания.



**Рис 2. Температурная зависимость затухания продольных акустических волн с частотой 10 МГц (1) и 30 МГц (2) в сплаве АМГ-2**

Связано это с тем, что в гранецентрированной кристаллической решетке атомы внедрения большей частью находятся в середине ребер или центре такой решетки. Эти внедренные атомы деформируют решетку, создавая искажения, обладающие тетрагональной симметрией. Максимальные искажения получаются в направлении между двумя ближайшими атомами решетки, т. е. по одной из главных осей типа  $\langle 100 \rangle$ . Все три вида позиций внедрения замещены беспорядочно, поэтому на каждый тип позиций приходится  $1/3$  общего числа внедренных атомов.

При распространении акустической волны равновероятное распределение атомов нарушается; равновесным становится то, в котором большее число внедренных атомов находится в позициях с тетрагональной осью, вдоль которой создается упругая деформация. В результате, за счет перемещения и переориентации, внедренных атомов осуществляется переход в новое равновесное состояние, характеризуемый временем релаксации  $\tau$ , зависящим от температуры, и для ультразвуковых волн будет наблюдаться релаксационный пик затухания с максимумом, который отвечает условию:

$$\nu = \nu_0 e^{-U/kT} \quad (4)$$

где  $\nu_0$  — частота колебаний внедренного атома в позиции внедрения,  $U$  — энергия активации движения примесных атомов,  $k$  — коэффициент Больцмана.

Энергия активации, необходимая для такого перехода, определяется типом и позицией внедренных атомов. Энергия активации  $E_A$ , определенная по частотному смещению релаксационных пиков в сплаве АМГ-2, оказалась равной **0,38 эВ** и связана с движением примесных атомов магния в решетке сплава. Подставляя значение  $E_A$  в соотношение (4), находим усредненную частоту колебаний атомов магния в позиции внедрения  $\nu_0 \sim 3 \cdot 10^{12}$  Гц.

Для оценки величины затухания по другому возможному механизму затухания акустических волн (механизм Ахиезера), мы воспользовались формулой Мэзона:

$$\alpha = \frac{3 \cdot 8.68 \gamma^2 k T \omega^2}{2 \rho \vartheta^2 \vartheta_{cp}^2} \quad (5)$$

где  $\rho$  — плотность,  $\vartheta$  и  $\omega$  — скорость и круговая частота акустической волны,  $\gamma$  — термодинамический параметр Грюнайзена, вместо которого можно использовать акустический параметр Грюнайзена  $\gamma_a$ . Этот параметр  $\gamma_a$ , согласно Беломестных В.Н., определяется из значений скорости продольных ( $\vartheta_L$ ) и поперечных ( $\vartheta_S$ ) акустических волн в изотропном материале.

$$\gamma = \frac{9(\vartheta_L^2 - 4\vartheta_S^2/3)}{2(\vartheta_L^2 + 2\vartheta_S^2)}, \quad (6)$$

Полученные экспериментальные данные по теплопроводности, и скорости акустических волн и расчетные значения параметра Грюнайзена, использовались для расчета затухания по формуле (5). Оказалось, что в сплавах затухание акустических волн по механизму Ахиезера на порядок меньше наблюдаемого затухания и, следовательно, вкладом этого механизма в наблюдаемый аномальный пик затухания можно пренебречь.

В сплаве САВ-1 максимум акустического затухания наблюдается только на частоте 10 МГц при температуре 335 К. Объясняется это большим значением затухания звука в этом сплаве на частоте 30 МГц, когда основной вклад в затухание дает уже не рассеяние на зернах структуры, а диффузное отражение на их границах, которое подавляет релаксационный механизм затухания, наблюдаемый на частоте 10 МГц. Таким образом, максимумы коэффициента затухания в сплавах обусловлены релаксационными процессами при переходе атомов основных легирующих элементов в новое равновесное состояние под действием акустической волны.

В третьем разделе главы 3 «Упругие модули и структурные изменения в сплавах САВ-1 и АМГ-2» рассмотрены результаты расчета средней Дебаевской скорости  $\bar{g}_D$ , и всех упругих модулей - модуля Юнга  $E$ , модуля сдвига  $G$ , модуля объемной упругости  $B$ , компонент тензора упругости  $c_{11}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{44}$  и коэффициента Пуассона. Результаты расчета приведены в таблице 2, где показаны и литературные данные для чистого алюминия и сплава АМГ-6.

**Таблица 2**

**Упругие модули алюминия и сплавов САВ-1, АМГ-2 и АМГ-6**  
**в единицах  $10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>**

| Материал         | $\rho$ | $c_{11}$ | $c_{44}$ | $c_{12}$ | $B$  | $E$  | $G$  | $\sigma$ |
|------------------|--------|----------|----------|----------|------|------|------|----------|
| Al (литер)       | 2.7    | 11.20    | 2.60     | 6.01     | 7.73 | 7.13 | 2.60 | 0.345    |
| САВ-1            | 2.69   | 9,62     | 2,34     | 4,94     | 6.50 | 6.32 | 2.34 | 0.337    |
| АМГ-2            | 2.68   | 10.17    | 2.44     | 5.29     | 6.91 | 6.56 | 2.44 | 0.342    |
| АМГ-6<br>(литер) | 2.64   | 10.60    | 2.59     | 5.42     | 7.14 | 6.89 | 2.59 | 0.34     |

Видно, что в алюминиевых сплавах упругие константы заметно зависят от состава. Примеси особенно сильно влияют на упругие модули  $E$  и  $B$ , которые характеризуют продольную и объемную деформации. В таблице. 2 приведены также значения коэффициента Пуассона  $\sigma$ :

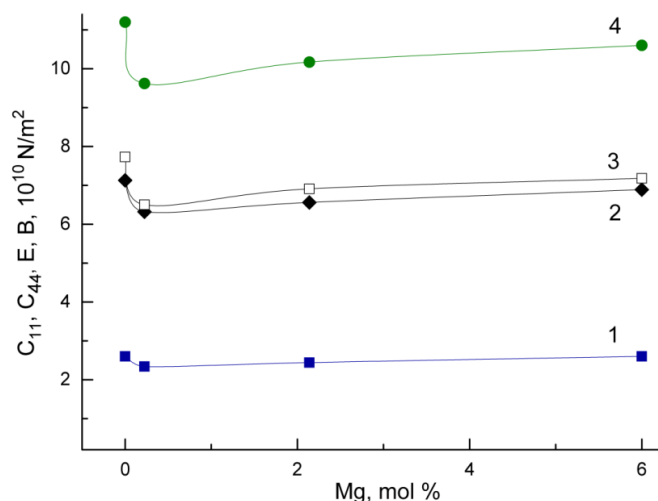
$$\sigma = \frac{0.5g_L^2 - g_S^2}{g_L^2 - g_S^2} \quad (7)$$

Видно, что значения коэффициента Пуассона для сплавов практически не отличаются от его значения для алюминия, что соответствует теории,

согласно которой значение коэффициента Пуассона в металлах и их сплавах меняется незначительно.

На рис. 3 приведена зависимость упругих коэффициентов  $c_{11}$  и  $c_{44}$ , модуля Юнга  $E$  и объемного модуля  $B$  в сплавах САВ-1, АМГ-2 и АМГ-6 от концентрации примеси Mg в их составе. Видно, что для всех упругих модулей наблюдается нелинейная зависимость. Объясняется это тем, что при малой концентрации примесей магния и кремния за счет их внедрения в междоузлия увеличивается концентрация вакансий, появляются поры.

В результате уменьшаются центральные силы взаимодействия между атомами и уменьшаются упругие модули, характеризующие силы сжатия и растяжения. В дальнейшем, с увеличением концентрации магния в сплаве, основную роль начинают играть атомы магния, хорошо растворяющиеся в твердом растворе. С увеличением содержания магния кристаллическая решетка становится снова более однородной, центральные силы связи между атомами снова растут и, соответственно, увеличиваются упругие модули.



**Рис. 3. Зависимость упругих коэффициентов  $c_{44}$  (1),  $c_{11}$  (4), модуля Юнга  $E$  (2) и объемного модуля  $B$  (3) в сплавах от концентрации примеси Mg**

В четвертом разделе главы 3 «Взаимосвязь упругих и тепловых свойств сплавов САВ-1 и АМГ-2 и параметра анизотропии» вначале приведены результаты определения температуры Дебая для сплавов САВ-1 и АМГ-2 из соотношения:

$$\theta_D = \frac{h\omega_D}{2\pi k} \quad (8)$$

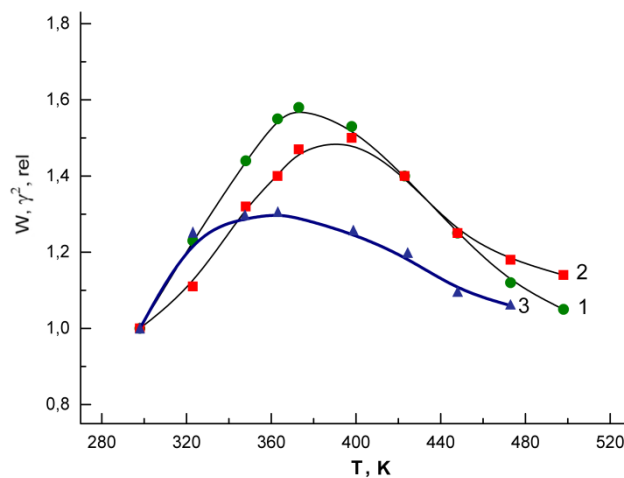
где  $k$  и  $h$  – константы Больцмана и Планка;  $\omega_D$  – максимальная частота колебаний кристаллической решетки. В отличие от других работ в наших расчетах использовались полученные нами значения скорости акустических волн для этих сплавов. Значения температуры Дебая для сплавов САВ-1 и

АМГ-2 составили соответственно 406 K и 409 K, то есть выше температуры Дебая для алюминия, равной 399 K.

Как было отмечено, для характеристики ангармонизма колебаний атомов служит параметр Грюнрайзена  $\gamma$ , который можно находить из уравнения Беломестных В.Н.:

$$\gamma = \frac{9(\vartheta_L^2 - 4\vartheta_S^2/3)}{2(\vartheta_L^2 + 2\vartheta_S^2)} \quad (9)$$

На рисунке 4. показано изменение квадрата параметра Грюнрайзена, экспериментальных значений скорости продольных и поперечных акустических волн и относительное изменение теплового сопротивления.



**Рис. 4. Температурная зависимость квадрата параметра Грюнрайзена (3) и теплового сопротивления сплавов АМГ-2 (2) и САВ-1(1)**

При этом затухание акустических волн  $\alpha$  и тепловое сопротивление материала  $W$  связаны с константой Грюнрайзена соотношением:

$$\alpha = \gamma^2 \frac{T\omega^2}{c_{eff}' W \vartheta_D^2} \quad (10)$$

где  $\vartheta_D$  - дебаевская скорость тепловых фононов.

Из рисунка 4 видно качественное соответствие представленных температурных зависимостей, объясняющее аномальное поведение коэффициента теплопроводности в сплавах САВ-1 и АМГ-2.

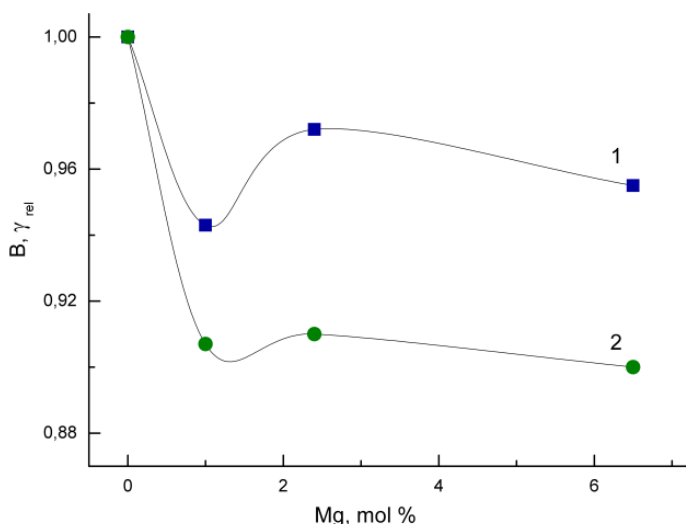
В пятом разделе главы 3 «Связь параметра ангармонизма со скоростями акустических волн и объемной упругостью в алюминиевых сплавах» показано, что если воспользоваться известными формулами, связывающими  $\vartheta_L$  и  $\vartheta_S$  с модулем Юнга  $E$ , плотностью вещества  $\rho$  и

коэффициентом Пуассона  $\sigma$ , то для параметра Грюнайзена можно получить простую связь с коэффициентом Пуассона (такой параметр Грюнайзена называют упругим)

$$\gamma_{\text{упр}} = \frac{3(1+\sigma)}{2(2-3\sigma)} \quad (11)$$

Анализ выражения (10) показывает, что при значениях коэффициента Пуассона для реальных поликристаллических тел от 0.05 до 0.46 параметр Грюнайзена находится в интервале 0.85-3.53 что соответствует большинству экспериментальных результатов.

На рис 5 приведена зависимость объемного модуля упругости  $B$  и константы ангармонизма для сплавов Al–Mg от концентрации примеси Mg.



**Рис. 5. Относительная зависимость константы ангармонизма (1) и объемного модуля упругости (2) для сплавов Al–Mg от концентрации Mg**

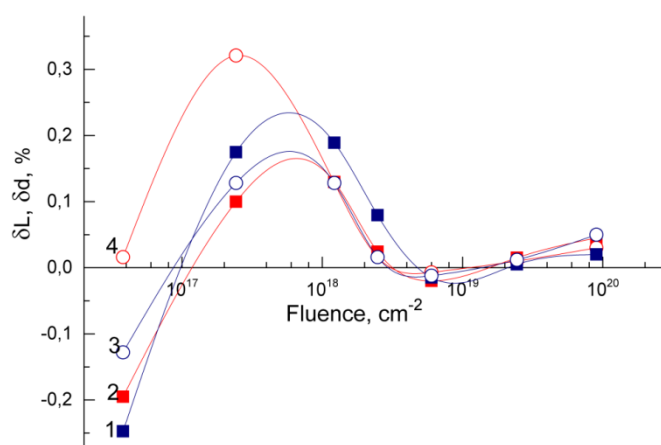
Видно, что примесь Mg одинаково влияет на объемный модуль упругости и константу ангармонизма. Поскольку атомы Mg при малой концентрации делают кристаллическую решетку сплава более пористой и ослабляют силы взаимодействия между атомами, то константа ангармонизма и объемный коэффициент упругости уменьшаются. В дальнейшем, с увеличением концентрации магния, эти атомы заполняют вакансии, «вакансионная пористость» решетки уменьшается, силы связи между атомами снова растут и, соответственно, ангармонизм их колебаний увеличивается. Таким образом, константа ангармонизма, являясь структурно чувствительным параметром служит параметром, связывающим линейные и нелинейные упругие свойства алюминиевых сплавов.

В четвертой главе «Влияние нейтронного излучения на упругие свойства и параметр решетки сплавов АМГ-2 и САВ-1» сначала приведены основные характеристики образцов до и после облучения. Сплавы САВ-1 и АМГ-2 имеют гранецентрированную кубическую структуру с

параметром решетки, для САВ-1,  $a=4,066\text{\AA}$  и для АМГ-2,  $a=4,072\text{\AA}$ , соответственно. Основными примесями в них являются магний, марганец и кремний. Неконтролируемые примеси (Ni, Cu, Fe, Zn и др.) в сумме составляли не более 0.5 масс. %. До облучения примеси распределяются неоднородно по всему объему сплава, и образуются локальные неоднородности в виде белых пятен нерастворимых интерметаллических фаз системы Al-Mg-Si-Fe с размерами  $1\div 10\text{ мкм}$ . После облучения флюенсом  $10^{19}\text{ см}^{-2}$  размеры интерметаллических фаз в сплавах уменьшаются до  $0,5\div 1,5\text{ мкм}$ , что приводит к более равномерному распределению основных примесей по всему образцу.

Во втором разделе четвертой главы рассмотрено «Радиационное набухание алюминиевых сплавов». К важнейшим радиационным эффектам относится деформация конструкционных материалов при облучении нейтронами. Показано, что деформация в облучаемых сплавах представляет собой проявление конкуренции сил взаимодействия в дефектной структуре кристалла, когда появляются междоузельные атомы и одновременно, зарождаются и растут вакансионные поры.

Детально было исследовано воздействие нейтронного облучения на деформацию образцов сплавов САВ-1 и АМГ-2, имеющих форму цилиндра с примерными размерами: высота 20 мм, диаметр 15 мм. Линейные размеры измерялись микрометром с абсолютной точностью 1 мкм. Изменение линейных размеров образцов определялось после воздействия потока нейтронов в диапазоне флюенсов от  $3,8\cdot 10^{16}$  до  $9,1\cdot 10^{19}\text{ н/см}^2$ . На рисунке 4.3 видно, что изменения для сплавов САВ-1 и АМГ-2 качественно одинаковы: сначала наблюдается усадка при флюенсе  $1,55\cdot 10^{17}\text{ н/см}^2$ , затем с возрастанием дозы облучения от  $1,55\cdot 10^{17}$  до  $1,1\cdot 10^{18}\text{ н/см}^2$  имеет место деформация растяжения. При дальнейшем возрастании дозы облучения линейные размеры изменяются в обратную сторону (сжатие).

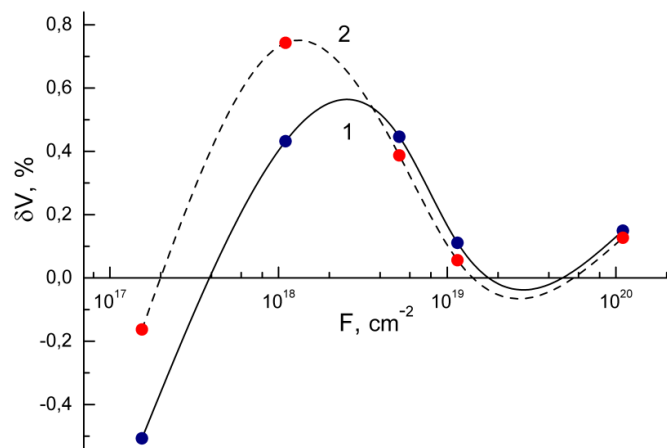


**Рис. 6. Относительное изменение длины (1, 2) и диаметра (3, 4) образцов САВ-1 (1, 3) и АМГ-2 (2, 4) в зависимости от флюенса нейтронов**

Полученные результаты позволяют определить относительное изменение объема образцов  $\Delta V/V_0$  под воздействием нейтронного излучения. Расчет проводился с помощью соотношения:

$$\Delta V/V_0 = [(1+A) \cdot (1+B)^2 - 1], \quad (12)$$

где  $A=\Delta L/L_0$  – относительное изменение длины образца  $L$ ,  $B=\Delta d/d_0$  – относительное изменение диаметра образца. Результаты расчета представлены на рис. 7. Видно, что при малых дозах нейтронного облучения наблюдается распухание, а при возрастании дозы облучения происходит обратное уменьшение объема образца и при величине дозы  $1.2 \cdot 10^{19}$  н/см<sup>2</sup> значение объема возвращается почти к исходному значению.



**Рис. 7. Относительное изменение объема образцов сплавов САВ-1 (1) и АМГ-2 (2) в зависимости от флюенса нейтронов**

Согласно теории, распределение пор по размерам подчиняется закону распределения Гаусса, и связано с зарождением пор вследствие нарушения устойчивости системы избыточных вакансий в облучаемом материале. При увеличении радиуса поры вакансионный поток на пору увеличивается из-за увеличения площади поверхности поры, уменьшения концентрации вакансий вблизи поры и соответствующего роста градиента концентрации вакансий. В результате, при малых флюенсах нейтронов происходит рост радиуса пор и соответствующее распухание сплава. При этом из условия минимизации свободной энергии, в пограничном слое поры создается разность давления с разных сторон и обеспечивается динамическое равновесие за счет добавочного давления  $\Delta P$ , связанного с поверхностным натяжением, которое противодействует давлению, создаваемому узельными и междоузельными атомами. Это добавочное давление задаётся формулой Лапласа и зависит от кривизны поверхности в этой точке и сил поверхностного натяжения. Для сферической полости радиуса  $R$  формула записывается в виде:

$$\Delta P = \frac{2 \cdot \gamma}{R} . \quad (13)$$



В соответствии с формулой (12), с увеличением размера поры добавочное давление  $\Delta P$  уменьшается, и при достижении определенного критического радиуса, крупные поры разрываются на ряд менее крупных кластеров и происходит уменьшение объемной доли крупных пор и увеличение доли фракций с меньшими размерами. В результате с увеличением дозы облучения происходит обратное уменьшение объема образца, что и наблюдается на эксперименте. Таким образом для описания деформации сплавов под действием нейтронного излучения впервые предложено учитывать давление, создаваемое узельными и междоузельными атомами, и противодействующие ему силы поверхностного натяжения.

В третьем разделе 4 главы «Влияние нейтронного облучения на параметр решетки в алюминиевых сплавах» приведены результаты исследования влияния облучения на изменения параметра решетки в сплавах САВ-1 АМГ-2. Изменение линейных размеров образцов определялось после воздействия интегрального потока нейтронов в диапазоне флюенсов от  $3.8 \cdot 10^{16}$  до  $9.1 \cdot 10^{19}$  н/см<sup>2</sup>. Как известно, конфигурация кристаллической решетки сплава характеризуется тем, что одни межатомные промежутки заняты, а другие свободны. Под действием нейтронного излучения такая структура изменяется за счет роста числа атомов, смещенных в междоузлия, соответственно увеличивается число вакансий и создаются локальные макроскопические «пустоты» – поры.

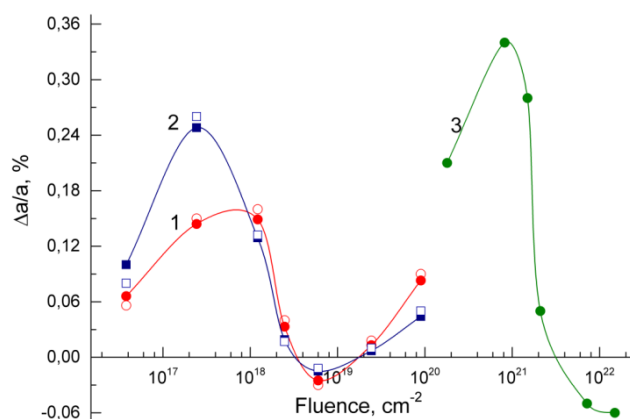
Относительное изменение объема образцов  $\delta V$  под воздействием нейтронного излучения можно выразить через изменение усредненного параметра решетки. Если учесть, что алюминиевые сплавы имеют гранецентрированную решетку и число ячеек в единице объема  $N_c$  однозначно определяется через число Авогадро  $N_A$ , то единичный объем выражается через объем одной кубической ячейки согласно соотношению:

$$V_0 = N_c a^3 = \frac{1}{4} \frac{\rho}{\mu} N_A a^3 \quad (14)$$

Легко показать, что относительное изменение параметра решетки под действием нейтронного облучения с достаточно высокой точностью определяется через относительное изменение объема образцов:

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{1}{3} \frac{\Delta V}{V_0} \quad (15)$$

Результаты расчета и литературные данные для молибдена показаны на рисунке 8, где светлые и темные точки - данные для двух образцов сплавов. Хорошее совпадение результатов для обоих образцов одного и того же сплава подтверждает надежность и достоверность полученных результатов.



**Рис. 8. Изменение параметра решетки в сплавах САВ-1 (1), АМГ-2 (2) и молибдена под действием облучения нейтронами**

Видно, что по сравнению с молибденом, происходит сдвиг зависимостей в область более низких доз на два порядка величины, который наблюдается и в других исследованиях для материалов с гранецентрированной кристаллической решеткой. Это изменение параметра решетки в сплавах САВ-1 и АМГ-2 объясняется двумя конкурирующими механизмами при изменении концентрации междоузельных атомов и пор в их объеме под действием нейтронного облучения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам на тему: «Взаимосвязь линейных и нелинейных упругих и тепловых свойств в алюминиевых сплавах» можно сделать следующие выводы:

1. Для решения поставленных задач на основе метода Вильямса-Лэмба было разработано устройство для прецизионного измерения скорости и затухания акустических волн в материалах.

2. Впервые экспериментально определены скорости и коэффициенты затухания продольных и поперечных акустических волн в зависимости от частоты и температуры, а также все упругие константы в алюминиевых сплавах САВ-1 и АМГ-2.

3. Обнаружены максимумы затухания релаксационного типа в температурной зависимости затухания продольных акустических волн в образцах САВ-1 и АМГ-2 на частотах 10 и 30 МГц. По частотному смещению этих максимумов определена энергия активации движения атомов магния в сплаве АМГ-2, равная 0,38 эВ. Найдена также средняя частота колебаний атомов магния в позиции внедрения равная  $\sim 3 \cdot 10^{12}$  Гц.

4. Впервые акустическим методом определен параметр Грюнайзена в сплавах САВ-1, АМГ-2 и показано качественное соответствие температурных зависимостей константы ангармонизма и коэффициента теплового сопротивления в этих сплавах.

5. Определена зависимость упругих модулей, в том числе модуля Юнга, модуля сдвига и адиабатического модуля объемной упругости от концентрации примеси магния в составе алюминиевых сплавов.

6. Установлено, что легирующие примеси Mg и Si практически одинаково влияют на величину объемного модуля упругости  $V$  и константы ангармонизма. Таким образом, параметр Грюнайзена может служить характеристикой, связывающей линейные и нелинейные упругие и тепловые свойств алюминиевых сплавов.

7. Обнаружено нелинейное изменение параметра решетки в облученных нейтронами сплавах САВ-1 и АМГ-2, связанное с динамикой изменения концентрации междоузельных атомов и вакансионных пор в их объёме в зависимости от дозы нейтронного облучения.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 ON AWARD OF  
SCIENTIFIC DEGREES AT INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS**

---

**INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS**

**BOLTABAEV AZIZBEK FARXADOVICH**

**INTERCONNECTION OF LINEAR AND NONLINEAR ELASTIC AND  
THERMAL PROPERTIES IN ALUMINUM ALLOYS**

**01.04.07 – Condensed matter physics**

**DISSERTATION ABSTRACT  
of the Doctor of Philosophy (PhD) on Physical and Mathematical Sciences**

**Tashkent – 2021**

**The theme of the dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number № B2021.3.FM637**

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at the Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at [www.inp.uz](http://www.inp.uz) and on the website of “Ziyonet” information and educational portal at [www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz).

|                               |                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Scientific supervisor:</b> | <b>Akhmedzhanov Farxad Rashidovich</b><br>Candidate of Physical and Mathematical Sciences, docent.                                                                                                               |
| <b>Official opponents:</b>    | <b>Ashurov Muxsin Xurramovich</b><br>Doctor of Physical and Mathematical Sciences,<br>Professor, academic<br><br><b>Mirzaev Sirojiddin Zaynievich</b><br>Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor |
| <b>Leading organization:</b>  | <b>Tashkent State Technical University named<br/>after Islam Karimov</b>                                                                                                                                         |

The defense of the dissertation will be held on “\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2021 at \_\_\_\_\_ at the meeting of Scientific Council No. DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics (Address: INP, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city, tel. (+99871)289-31-18; fax: (+99871)289-36-65; e-mail: [info@inp.uz](mailto:info@inp.uz)).

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through in the Information Resource Center of Institute of Nuclear Physics (registered under No. \_\_\_\_\_) Address: INP, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city. tel. (+99871)289-31-19).

The abstract of dissertation was distributed on «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021  
(Registry record No. \_\_\_\_\_ dated “\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2021)

**M.Yu. Tashmetov**  
Chairman of Scientific Council  
on award of scientific degree  
D.Ph.-M.S., Professor

**O.R. Tojiboev**  
Scientific Secretary of the Scientific Council  
on Award of Scientific Degrees, PhD.Ph-M.S

**S.V. Artemov**  
Deputy chairman of scientific seminar of the Scientific  
Council on Award of Scientific Degrees,  
D.Ph.-M.S., professor

## INTRODUCTION (annotation of PhD dissertation)

**The aim of the research** is determination of the relationship between linear and nonlinear elastic and thermal properties of aluminum alloys depending on the content of impurities in them in a wide range of frequencies and temperatures by acoustic methods.

**The tasks of the research:**

determine the velocity and attenuation of acoustic waves in aluminum alloys SAV-1 and AMG-2, depending on the concentration of impurities and on temperature;

determine the activation energy of the motion of impurity atoms in aluminum alloys AMG-2;

on the basis of experimental results, determine the values of the Gruneisen parameter and all elastic constants of aluminum alloys SAV-1 and AMG-2;

to establish the effect of neutron radiation on the dynamics of changes in the lattice parameter of the SAV-1 and AMG-2 alloys.

**The object of research** are the linear and nonlinear elastic and thermal properties of SAV-1 and AMG-2 aluminum alloys.

**The subject of research** is the propagation velocity and attenuation coefficient of acoustic waves, thermal conductivity coefficient and lattice parameter of SAV-1 and AMG-2 aluminum alloys.

**The scientific novelty of the research** is as follows:

for the first time experimentally determined the velocities and attenuation coefficients of both longitudinal and transverse acoustic waves in aluminum alloys SAV-1 and AMG-2 at ultrasonic frequencies in the frequency range from 10 to 50 MHz;

determined the activation energy of the motion of magnesium atoms in the lattice of the AMG-2 alloy, equal to 0.38 eV and the average vibration frequency of magnesium atoms in the position of insertion, equal to  $\sim 3 \cdot 10^{12}$  Hz;

for the first time the Grüneisen parameter in aluminum alloys SAV-1 and AMG-2, equal to 2.04 and 2.06 respectively, and also its temperature dependence were determined;

the dependence of elastic constants, including shear modulus  $G$ , Young's modulus  $E$ , adiabatic modulus of bulk elasticity  $B$ , on the effective concentration of magnesium impurities (0.45 - 2.10%) in the composition of aluminum alloys SAV-1 and AMG-2 was determined;

the device for determining the speed and attenuation of acoustic waves in materials has been developed and the pulse interference method has been modernized, which has made it possible to increase the accuracy of determining these parameters.

**Implementation of the research results.**

Based on the results obtained to determine the interconnectedness of linear and nonlinear elastic and thermal properties of aluminum alloys:

certain velocities and attenuation coefficients of both longitudinal and transverse acoustic waves in aluminum alloys SAV-1 and AMG-2, as well as the

activation energy of the movement of magnesium atoms in the lattice of the AMG-2 alloy were used at the unique scientific object "Research nuclear reactor WWR-SM" (Letter of the Academy of Sciences of RUz No. 2 / 1255-2320 dated 20.08.2021). The use of scientific results made it possible to calculate the temperature regime of the WWR-SM reactor;

a certain Grüneisen parameter and its dependence on temperature in aluminum alloys SAV-1 and AMG-2 were used at the unique research facility "Research nuclear reactor WWR-SM" (Letter of the Academy of Sciences of RUz No. 2 / 1255-2320 dated 20.08.2021). The use of scientific results made it possible to predict the dependence of the coefficients of thermal conductivity and thermal resistance in these alloys on temperature;

The dependence of elastic moduli on the effective concentration of magnesium impurities in the composition of aluminum alloys was used in the framework of the fundamental project BF2-006 "Minimization of the activity of fission products and transuranium isotopes and the study of their effect on the structural materials of the WWR-SM nuclear reactor, INP of AS of RUz ". (Letter of the Academy of Sciences of RUz No. 2 / 1255-2320 dated 20.08.2021). The use of scientific results made it possible to assess the degree of swelling of the SAV-1 alloy used as a structural material in fuel elements of a nuclear reactor WWR-SM INP of AS of RUz depending on the radiation dose;

the developed pulse interference method for measuring the speed and attenuation of acoustic waves, as a device for precision determination of the speed of acoustic waves in materials, is registered with the Intellectual Property Agency of the Republic of Uzbekistan (RUz patent for utility model No. FAP 01545, dated 28.09.2020). The use of this development made it possible to determine the mechanical stresses arising in the modules made of the SAV-1 alloy and operating in the core of the WWR-SM nuclear reactor of AS of RUz.

**The structure and volume of the dissertation.** The dissertation work consists of an introduction, four chapters, a conclusion and a list of used literature. The volume of the thesis is 106 pages.

**ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I бўлим (I часть; I part)**

1. Abdukadirova I., Alikulov Sh.A., Akhmedzhanov F.R., Baytelesov S.A., Boltabaev A.F., Salikhbaev U.S. High-Temperature Thermal Conductivity of SAV-1 Aluminum Alloy // Atomic Energy. – Moscow, 2014. – Vol. 116, No 2. – pp. 100-104. (№ 3. Scopus; IF=0.384)
2. Ахмеджанов Ф.Р., Курталиев Э.Н., Эшниязов О.И., Болтабаев А.Ф. Затухание акустических волн в алюминиевом сплаве САВ-1 // СамДУ илмий тадқиқотлар ахборотномаси. – Самарканд, 2015. - № 5. – С. 49-52. (01.00.00. №2)
3. Ахмеджанов Ф.Р., Болтабаев А.Ф., Курталиев Э.Н., Эшниязов О.И. Акустический метод контроля структурных изменений в конструкционных материалах ядерных реакторов // Горный вестник Узбекистана. – Навои, 2016. – Т. 4, № 67. - С. 81-84. (05.00.00 №7)
4. Ахмеджанов Ф.Р., Аликулов Ш.А., Болтабаев А.Ф., Курталиев Э.Н., Эшниязов О.И. Акустический прецизионный метод определения упругих свойств конструкционных материалов ядерных реакторов // СамДУ Илмий ахборотномаси. – Самарканд, 2016. - № 5. - С. 27-32. (01.00.00. №2)
5. Салихбаев У.С., Ахмеджанов Ф.Р., Аликулов Ш.А., Байтелесов С.А., Болтабаев А.Ф., Кунгуров Ф.Р., Кудиратов С.Н., Таджибаев Д.П. Упругие модули и коэффициент Пуассона поликристаллического сплава алюминия САВ-1 // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2017. – (№1(19). - С. 33-38. (01.00.00. №5)
6. Ахмеджанов Ф.Р., Болтабаев А.Ф. Деформация сплава АМГ-2 под воздействием нейтронного излучения // Горный вестник Узбекистана. – Навои, 2018. - Т. 1, №72. - С. 57-59. (05.00.00 №7)
7. Ахмеджанов Ф.Р., Болтабаев А.Ф., Курталиев Э.Н., Назаров Ж.Т. Затухание ультразвуковых волн и акустический параметр Грюнайзена в алюминиевых сплавах // СамДУ Илмий ахборотномаси – Самарканд, 2019. - № 5. - С. 150-153. (01.00.00. №2)
8. Муминов Т.М., Ахмеджанов Ф.Р., Болтабаев А.Ф., Абдирахмонов У.Ш. Влияние нейтронного облучения на параметр решетки в алюминиевых сплавах // Доклады Академии Наук РУз. – Ташкент, 2021. - № 2. - С. 65-70. (01.00.00. №7)
9. Фойдали моделга Патент. № FAP 01545. Материалларда акустик тўлқинлар тезлигини ўта аниқ аниқловчи қурилма / Ахмеджанов Ф.Р., Хусаиноа И.А., Азаматов З.Т., Болтабаев А.Ф., Саидвалиев У.А. // Ташкент, 28.09.2020.



## II бўлим (II часть; II part)

10. 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.
11. Ахмеджанов Ф.Р., Азаматов З.Т., Болтабаев А.Ф., Эшниязов О.И. Упругие свойства алюминиевого сплава САВ-1 // Международная конференция: «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», 5-6 ноября 2015. – Ташкент: ФТИ АН РУз, 2015. – С. 34-37
12. Ахмеджанов Ф.Р., Болтабаев А.Ф. Курталиев Э.Н. Эшниязов О.И. Ультразвуковые исследования упругих свойств алюминиевых сплавов // Тезисы докладов 10 Международной конференции «Ядерная и радиационная физика» 8-11 сентября 2015. – Курчатов (Казахстан), 2015. - С. 41
13. Аликулов Ш.А., Ахмеджанов Ф.Р., Байтелесов С.А., Болтабаев А.Ф., Кунгуров Ф.Р., Салихбаев У.С. Характеристики упругости алюминиевого сплава САВ-1 // II Всероссийская акустическая конференция, 6-9 июня 2017. - Нижний Новгород (Россия), 2017. - С. 72
14. Аликулов Ш.А., Ахмеджанов Ф.Р., Байтелесов С.А., Болтабаев А.Ф., Кунгуров Ф.Р., Таджикибаев Д.П. Радиационное распухание алюминиевых сплавов АМГ-2 и САВ-1 // XI Международная конференция «Ядерная и радиационная физика»: Тез. докл. 12-15 сентября, 2017. – Алматы (Казахстан), 2017. – С. 275.
15. Ахмеджанов Ф.Р., Болтабаев А.Ф., Байтелесов С.А., Кунгуров Ф.Р. Влияние нейтронного излучения на деформацию алюминиевых сплавов // Тез. докл. Международной конференции по Физической электронике ИРЕС-7, 18-19 мая 2018. - Ташкент, 2018. - С. 88
16. Ахмеджанов Ф.Р., Болтабаев А.Ф., Назаров Ж.Т. Ультразвуковой метод контроля структурных изменений в твердых растворах // Международная научно-техническая конференция, 22-23 ноября 2018. - Навои, 2018. - С. 160.
17. Ахмеджанов Ф.Р., Болтабаев А.Ф. Механизмы затухания акустических волн в алюминиевых сплавах // Сборник докладов VI Международной конференции «Современные проблемы физики», 28-30 июня 2018.– Душанбе, 2018. - С. 254-256
18. Ахмеджанов Ф.Р., Болтабаев А.Ф., Назаров Ж.Т. Акустический коэффициент Грюнайзена алюминиевых сплавов // «Қаттиқ жисмлар физикасининг долзарб муаммолари»: II Республика илмий-амалий анжумани, 4 май 2019.– Бухара, 2019. - С. 54.
19. Ахмеджанов Ф.Р., Болтабаев А.Ф., Назаров Ж.Т. Упругие свойства и параметр Грюнайзена алюминиевых сплавов АМГ-2 и САВ-1 // Труды XXXII сессии Российского акустического общества, 14-18 октября, 2019. – Москва, 2019. - С. 1351-1358.
20. Akhmedzhanov F.R., Boltabaev A.F. Elastic nonlinear swelling of aluminum alloys under influence of neutron radiation // 24 International Conference on Nonlinear Elasticity in Materials, June 24-28, 2019. – Krakow, 2019. - p. 12.

Автореферат « ЎзМУ хабарлари» илмий журнали таҳририятида  
таҳрирдан ўтказилиб, ўзбек ва рус тилларидаги матнлар ўзаро  
мувофиқлаштирилди (09.09.2021 йил).