

**YADRO FIZIKASI INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

YADRO FIZIKASI INSTITUTI

TADJIBAYEV DIYER PULATOVICH

**YADRO REAKTORI KONSTRUKSION MATERIALLARI SAV-1 VA
AMG-2 LARNING STRUKTURASI VA MUSTAHKAMLIK
XARAKTERISTIKALARIGA NEYTRON NURLANISHINING TA'SIRI**

01.04.07 – kondensirlangan holat fizikasi

**fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Toshkent – 2023

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
avtoreferati mundarijasi**

**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**

Tadjibayev Diyer Pulatovich

Yadro reaktori konstruksion materiallari SAV-1 va AMG-2 larning
strukturasiga va mustahkamlik xarakteristikalariga neytron
nurlanishining ta'siri 3

Таджибаев Диер Пулатович

Влияние нейтронного облучения на структуру и прочностные
характеристики конструкционных материалов САВ-1 и АМГ-2
ядерного реактора 23

Tadjibaev Diyer Pulatovich

Effect of Neutron Irradiation on the Structure and Strength
Characteristics of the Construction Materials SAV-1 and AMG-2 of the
Nuclear Reactors 43

E'lon qilingan ishlar ro'yhati

Список опубликованных работ
List of published works 49

**YADRO FIZIKASI INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

YADRO FIZIKASI INSTITUTI

TADJIBAYEV DIYER PULATOVICH

**YADRO REAKTORI KONSTRUKSION MATERIALLARI SAV-1 VA
AMG-2 LARNING STRUKTURASI VA MUSTAHKAMLIK
XARAKTERISTIKALARIGA NEYTRON NURLANISHINING TA'SIRI**

01.04.07 – kondersirlangan holat fizikasi

**fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Toshkent – 2023

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2023.4.PhD/FM184 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Yadro fizikasi institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (xulosa)) Ilmiy kengashning internet sahifasida (www.inp.uz) va "ZiyoNet" Axborot-ta'lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar: **Baytelesov Sapar Akimovich**
texnika fanlari doktori, katta ilmiy xodim

Rasmiy opponentlar: **Axmedjanov Farxod Rashidovich**
fizika-matematika fanlari doktori, dotsent

Mussayeva Malika Anvarovna
fizika-matematika fanlari doktori, katta ilmiy xodim

Yetakchi tashkilot: **Qozog'iston Respublikasi Energetika vazirligi**
Yadro fizikasi instituti

Dissertatsiya himoyasi Yadro fizikasi instituti huzuridagi DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 raqamli Ilmiy kengashning 2023-yil _____ soat _____ dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100214, Toshkent shahri, Ulug'bek qo'rg'oni, Yadro fizikasi instituti. tel. (+99871) 289-31-41; faks (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

Dissertatsiya bilan Yadro fizikasi institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (_____ raqami bilan ro'yxatga olingan). Manzil: 100214, Toshkent shahri, Ulug'bek qo'rg'oni, YaFI. tel. (+99871) 289-31-19.

Dissertatsiya avtoreferati 2023-yil "____" _____ da tarqatildi.
(2023-yil "____" _____ dagi _____ raqamli reyestr bayonnomasi).

M.Yu.Tashmetov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy
kengash raisi, f.-m.f.d., professor

O.R.Tojiboyev

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy
kengash ilmiy kotibi, f.-m.f. PhD,
katta ilmiy xodim

E.M.Tursunov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy
kengash huzuridagi ilmiy seminar raisi,
f.-m.f.d., professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasining annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Hozirgi vaqtda konstruksion materiallar tadqiqot yadro reaktorlarining asosiy konstruksion tuzilishini va zarur mexanik mustahkamligini ta'minlashi kerak. Neytron nurlanishi ta'sirida yadro reaktorlarining konstruksion materiallarida strukturaviy va fazaviy o'zgarishlar yuz beradi, ular konstruksion materiallarning fizikaviy va mexanikaviy xususiyatlarini sezilarli darajada o'zgartiradi, shuningdek, radiatsion mo'rtlashishga, radiatsion oquvchanlik va radiatsion shishishga olib kelishi mumkin. Nurlanish ta'sirida bu xususiyatlarning o'zgarishi reaktor konstruksiyasiga, ekspluatatsiya xususiyatlariga va xavfsizligiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Shuning uchun ilmiy tadqiqot reaktorlarining ishlash muddatini aniqlashda konstruksion materiallarning radiatsiyaga chidamliligi masalalari tobora muhim ahamiyat kasb etmoqda.

Hozirgi vaqtda SAV-1 va AMG-2 alyumin qotishmalari ko'pgina ilmiy tadqiqot reaktorlarining faol zonasida konstruksion materiallar sifatida ishlatiladi. Faol zona hamda tayanch panjarasining mustahkamligi reaktor faol zonasi tuzilishini ta'minlaydigan va konstruksiyasini himoya qiladigan muhim parametrdir. Konstruksion materiallarning mustahkamligini va strukturasi o'lchash texnik jihatdan qiyin ish hisoblanadi, ular beta va gamma nurlanish ko'rinishida yuqori aktivlikka ega. VVR-SM ilmiy tadqiqot reaktorining bir qancha konstruksion materiallari 60 yildan ortiq vaqt davomida foydalanilmoqda. Shuning uchun konstruksion materiallarning mustahkamlik xususiyatlarini neytron flyuyensiga bog'liqligini o'rganish dolzarb vazifalardan biri hisoblanadi. Issiqlik ajratuvchi yig'ilma (IAY) kam boyitilgan yoqilg'iga o'tgandan so'ng har bir IAY massasi 1 kilogrammdan ortiqroq oshdi va bu konstruksion materiallarning yuklanishining oshishiga olib keldi.

Respublikamizda yadro energetikasidan tinchlik maqsadida foydalanishga, shuningdek shu yo'nalishda dunyo miqyosidagi fundamental va amaliy tadqiqotlar o'tkazishga katta e'tibor berilmoqda. Mamlakatimiz ilm-fanni rivoji hamda fundamental tadqiqot natijalarini hayotga tatbiq qilish uchun fundamental tadqiqotlarning muhim yo'nalishlari O'zbekistonni yanada rivojlantirish bo'yicha 2022-2026-yillardagi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasiga¹, shuningdek, 2019-2029-yillarda O'zbekiston Respublikasida atom energetikasini rivojlantirish Konsepsiyasiga kiritilgan.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-sonli "2022-2026-yillarda Yangi O'zbekistonni rivojlantirish strategiyasi to'g'risida", 2018-yil 7-maydagi PF-3698-sonli "Iqtisodiyot tarmoqlari va sohalariga innovatsiyalariga joriy etish mexanizmlarini takomillashtirish bo'yicha qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida", 2019-yil 7-maydagi PF-4165-sonli "O'zbekiston

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining "2022-2026-yillarda yangi O'zbekistonni rivojlantirish strategiyasi to'g'risida"gi 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-sonli Farmoni

Respublikasida 2019-2029-yillarda atom energetikasini rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash to'g'risida" farmonlari, O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2018-yil 27-apreldagi PQ-3682-sonli "Innovatsion g'oyalar, texnologiyalar va loyihalarni amaliy joriy qilish tizimlarini yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida" qarori hamda ushbu sohadagi boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishda ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlantirishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Mazkur dissertatsiya ishi respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining II. "Energetika, energotejamkorlik va muqobil energiyamanbalari" ustuvor yo'nalishiga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Ilmiy tadqiqot reaktorlari uchun turli xil konstruksion materiallarning radiatsiyaga chidamliligi, shuningdek, neytron nurlanishning (0,8 MeV dan yuqori) yadro yoqilg'isi elementlarining xususiyatlariga ta'sirini o'rganish bo'yicha tadqiqotlar jahonning yetakchi ilmiy markazlari olimlari, jumladan, amerikalik (Y.S.Kim, A.Yacout), rossiyalik (V.M.Lebedov, S.P.Orlov, A.L.Ijutov, K.A.Konoplev, S.P.Fridman, C.N.Votinov), qozog'istonlik (O.P.Maksimkin, A.V.Yarovchuk, L.G.Turubapova), polshalik (V.Shteke, T.Vagner, E.Xaevska), isroillik (A.Minitz, A.Shtechman), ukrainalik (V.N.Voevodin va boshqalar), o'zbekistonlik (I.Abdukadirova, S.A.Baytelesov, Sh.A.Aliqulov) va boshqa olimlar tomonidan olib borilgan.

Ushbu tadqiqotlar natijasida tez neytronlar (0,8 MeV dan ortiq) bilan nurlanish konstruksion materiallarning mustahkamlik xususiyatlarini va korroziyaga chidamliligini o'zgartirishi aniqlandi; 353 K haroratda neytron nurlanishining yuqori flyuenslarida ($1,3 \cdot 10^{22}$ n/sm²) SAV-1 qotishmasining eskirishini tezlashtirish ta'siri aniqlandi, bu materialdagi ko'plab Ginie-Preston chiziqli zonalar shakllanishida ifodalanadi; SAV-1 qotishmasining mustahkamlik xususiyatlari nurlanish dozalariga ham, radiatsiya isitish haroratiga ham bog'liqligi ko'rsatilgan. Biroq, tez neytronlar ta'sirida strukturaviy o'zgarishlar yetarli darajada o'rganilmagan.

Ilmiy tadqiqot reaktorlarining konstruksion materiallarining xavfsiz ishlash muddatini aniqlash muhimligi sababli, bugungi kunda VVR-SM tipidagi yadro reaktorlaridagi SAV-1 va AMG-2 konstruksion materiallarining strukturasi va mustahkamlik xususiyatlariga neytron nurlanishining ta'sir qonuniyatlarini o'rganish juda muhimdir. Tez neytronlar flyuyenslariga bog'liq holda SAV-1 va AMG-2 qotishmalarining strukturaviy va mustahkamlik xususiyatlarining o'zgarishi yetarlicha o'rganilmagan, faqatgina bir nechta flyuyens qiymatlari uchun ma'lumotlar mavjud, shuning uchun bu xususiyatlarning o'zgarishini bashorat qilish kondensirlangan holatlar fizikasining dolzarb vazifasidir.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan ilmiy tadqiqot muassasasining ilmiy tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya ishi Yadro fizikasi instituti ilmiy-tadqiqot ishlari rejasining FA-F2-F075+F070 raqamli "Reaktor va yuqori haroratli o'ta o'tkazgich materiallarining o'ziga xos elektrik, issiqlik va texnik xossalarini tadqiq etish" (2007-2011), F2-FA-F112

raqamli “Yadro materiyasining xususiyat va holatlarini yuqori va quyi energiyalarda tadqiq qilish” (2012-2016) mavzusidagi loyihalari doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi neytron nurlanishining SAV-1 va AMG-2 qotishmalari konstruksion materiallarining strukturasi va mustahkamlik xususiyatlariga ta’sirini tahlil qilishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

yadro reaktorlari konstruksion materiali SAV-1 qotishmasining sirt va hajmiy strukturasi neytronlar nurlanishining ta’sirini aniqlash;

SAV-1 va AMG-2 tipidagi alyumin qotishmalari namunalarining nurlanishdan oldin va 10^{16} dan 10^{20} n/sm² gacha bo‘lgan flyuyenslarda nurlantirilgandan keyin turli xil indentorlarda (yuklarda) mikroqattiqqligini aniqlash;

yadro reaktorlari konstruksion materiali SAV-1 qotishmasining bir qator mustahkamlik xarakteristikalariga neytron nurlanishining hissasini aniqlash;

tez neytronlar flyuyensi qiymatlariga alyumin qotishmalarining mikroqattiqqligi va mustahkamligining o‘zgarishi o‘rtasidagi bog‘liqlikni tahlil qilish va aniqlash;

neytron flyuyenslarining 10^{16} n/sm² dan $3,5 \cdot 10^{22}$ n/sm² gacha bo‘lgan oralikda SAV-1 namunalarining oquvchanlik chegarasi bilan mikroqattiqlik bog‘liqligini aniqlash.

Tadqiqot ob’yekti sifatida aralashmalarining foizi bilan farqlanuvchi konstruksion materiallar AMG-2 va SAV-1 alyumin qotishmalarining namunalari hisoblanadi.

Tadqiqot predmeti sifatida olingan tez neytronlar flyuyenslariga qarab AMG-2 va SAV-1 alyuminiy qotishmalarining strukturasi va mustahkamligiga ta’sirini o‘rganish hisoblanadi.

Tadqiqot usullari. Mikroqattiqlikni aniqlash uchun standart qurilmasidan (IIMT-3) foydalanilgan, qotishmaning mustahkamlik qiymatlari yuklama mashinasi (LM-20) bilan aniqlangan. Strukturani o‘rganish uchun Furrye kuchlanish difraktometri neytron difraksiyasi va ko‘p funksiyali EMPYREAN rentgen difraktometri rentgen nurlari difraksiyasi bo‘yicha tajribalar o‘tkazildi.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

birinchi marta SAV-1 namunalari 10^{18} n/sm² neytron flyuyensida nurlantirilganda Mg₂Si ikkinchi fazasi cho‘qqisining intensivligi 16%ga kamayganligi rentgenogrammada aniqlangan;

nurlanish dozasi 10^{18} n/sm² flyuyensgacha oshirilganda $2\theta_B \sim 124^\circ$ burchak yaqinida tekisliklararo masofa 1,0132 Å dan 1,0011 Å gacha kamayishi, hamda aks etish burchagi ($2\theta_B$) SAV-1 namunasidagi kremniy ionlarining alyumin tugunlararo bo‘shliqda ko‘chishi hisobiga oshishi ko‘rsatilgan;

10^{20} n/sm² flyuyensda nurlantirilgan namunalarning kristall panjarasining parametrlari o‘zgarishi, mikroqattiqqligining SAV-1 namunalari uchun 33%ga, AMG-2 namunalari uchun 10%ga oshishiga olib kelishi ko‘rsatilgan;

namunalarning oquvchanligi chegarasi va mikroqattiqqligining flyuyenslarga bog‘liqligini hisoblash uchun empirik formula olingan, shuningdek, 10^{16} - $3,5 \cdot 10^{22}$

n/sm² nurlanish dozalari oralig'ida SAV-1 namunalari uchun mikroqattqlik bilan oquvchanlik chegarasi o'rtasidagi bog'liqlik aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

kristall panjarasining parametrlari o'zgarishi rentgenostrukturaviy fazoviy tahlilda aniqlangan natijalar, FullProf dasturi yordamida olingan natijalar bilan mos kelganligi aniqlangan;

SAV-1 alyumin qotishmasining 10¹⁶ n/sm² va undan yuqori neytron flyuyensida nurlantirilganda mustahkamlik xarakteristikalari o'sishi aniqlangan.

Tadqiqot natijalarining ishonchligi hisoblash va eksperimental tadqiqotlarga kompleks yondashuv va katta hajmdagi tajribalar bilan ta'minlanadi. O'lchashning yaxshi sinalgan zamonaviy usullaridan foydalanish, qo'yilgan vazifalarning to'g'riligi va fizikaviy asosligi, shuningdek tajriba natijalarining fundamental qonunlar va radiatsiya fizikasining asosiy tamoyillariga muvofiqligi, boshqa mualliflar tomonidan olingan natijalarga zid kelmasligi bilan asoslanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Natijalarning ilmiy ahamiyati shundan iboratki, SAV-1 va AMG-2 alyumin qotishmalarining strukturasi va mustahkamlik xususiyatlariga 10¹⁶ n/sm² dan 3,5·10²² n/sm² flyuyensgacha bo'lgan tez neytronlarning ta'siri o'rtasidagi bog'liqlik aniqlangan. Bu esa konstruksion materiallarning mustahkamlik chegarasi tugagunga qadar reaktorning xavfsiz ishlashini baholash imkonini beradi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati shundan iboratki, ular mavjud tadqiqot yadro reaktorlarining ishlash muddatini aniqlashda, shuningdek, yadroviy qurilmalar uchun yaxshilangan parametrlarga ega yangi radiatsiyaga chidamli konstruksion materiallarni yaratishda foydalanish mumkinligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Neytron nurlanishining yadro reaktori konstruksion materiallarining strukturaviy va mustahkamlik xususiyatlariga ta'siri asosida:

SAV-1 namunalarida 10¹⁸ n/sm² neytron flyuensida rentgenogrammada Mg₂Si ikkinchi fazasining intensivligi 16% ga; nurlanish dozasi oshgani sayin, SAV-1 namunalarida 10¹⁸ n/sm² fluens bilan nurlantirilganda taxminan 2θ_B ~ 124° burchakdagi tekisliklararo masofa 1,0132 Å dan 1,0011 Å gacha kamayishi radioaktiv chiqindilarni boshqarish, tibbiyot va radiatsion materiallarshunoslik uchun radioizotoplar ishlab chiqarish sohasida VVR-K yadroviy tadqiqot reaktorida foydalanilgan (Qozog'iston Respublikasi Energetika vazirligi Yadro fizikasi institutining 2023 yil 16 noyabrdagi 34-15.08-12/1359-son xati). Natijalardan foydalanish VVR-K reaktorining konstruksion materiallarida SAV-1 qotishmalarining strukturaviy va mustahkamlik xususiyatlarini aniqlash imkonini bergan;

SAV-1 va AMG-2 alyumin qotishmalarining strukturasi va mustahkamlik xususiyatlarining tez neytronlarning 10¹⁶ n/sm² dan 3,5·10²² n/sm² gacha bo'lgan oralig'idagi flyuyenslari o'rtasidagi bog'liqlik Yadro fizikasi institutida foydalanilgan (O'zR FA ning 2023 yil 28 noyabrdagi 2/1255-2519-son xati). Natijalardan foydalanish VVR-SM reaktorida konstruksion materiallarni

almashtirish muddatini o'z vaqtida aniqlash, hamda konstruksion materiallarning mustahkamlik chegarasini baholash imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarini approbatsiyasi. Dissertatsiya ishining asosiy natijalari 11 ta xalqaro va respublika anjumanlarida ma'ruza qilingan hamda muhokama qilingan.

Tadqiqot natijalarini e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 18 ta ilmiy ish e'lon qilingan, ulardan Oliy attestatsiya komissiyasining doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 6 ta maqola, shulardan, 5 tasi xorijiy jurnallarda.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya tarkibi kirish, to'rtta bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan tashkil topadi. Dissertatsiyaning umumiy hajmi 102 betdan iborat.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi asoslanadi, maqsad va vazifalarni shakllantiradi, tadqiqot ob'ekti, predmeti va usullari aniqlangan. Tadqiqotlarning respublikada fan va texnologiyalarni rivojlantirishning asosiy ustuvor yo'nalishlari bilan bog'liqligi ko'rsatilgan. Tadqiqotning ilmiy yangiligi bayon etilgan, olingan natijalarning ishonchliligi asoslantirilgan, ularning ilmiy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, natijalarni joriy etish va ishni sinovdan o'tkazish, shuningdek, dissertatsiya tuzilishi to'g'risida qisqacha ma'lumotlar berilgan.

Dissertatsiyaning **“Alyuminiy qotishmalarining fizikaviy-kimyoviy xususiyatlari”** deb nomlangan birinchi bobida adabiyotlarda e'lon qilingan ilmiy tadqiqot reaktorlarida konstruksion materiallar sifatida ishlatiladigan alyuminiy qotishmalarining tarkibi, strukturasi va xususiyatlari, shuningdek, neytron nurlanishining ($E_n > 0,8$ MeV) SAV-1 va AMG-2 alyuminiy qotishmalarining strukturasi va xususiyatlariga ta'siri bo'yicha tadqiqotlar natijalariga keltirilgan. Ularning fizikaviy xususiyatlari asosan ulardagi alyuminiy va asosiy qotishma elementlari – magniy, kremniy konsentratsiyalarining nisbatiga bog'liq. Adabiyot ma'lumotlarini tahlil qilish shuni ko'rsatadiki, (10^{16} - 10^{20}) n/sm² diapazonidagi neytron flyuyensiga strukturani bog'liqligining tizimli tahlili mavjud emas. Adabiyotlardagi ma'lumotlarni tahlil qilish asosida neytron nurlanishining SAV-1 va AMG-2 qotishmalari konstruksion materiallarining strukturasi va mustahkamlik xususiyatlariga ta'sir qilish mexanizmini aniqlashning hal qilinmagan muammosi, tadqiqotning maqsadi va vazifalari aniqlandi.

Dissertatsiyaning **“Tadqiqot ob'ektlari va tajriba uslublari”** deb nomlangan ikkinchi bobi alyuminiy konstruksion qotishmalari bo'lgan SAV-1 va AMG-2 namunalarining tadqiqot ob'ekti xususiyatlariga bag'ishlangan. Namunalar nurlantirish uchun O'zR FA Yadro fizikasi institutining 10 MW quvvatga ega VVR-SM tadqiqot reaktorining vertikal kanallaridan biriga joylashtirilgan. Reaktor faol zonasining 3-2 vertikal kanali ishlatilgan. Kanaldagi tez neytronlar oqimi zichligi ($E_n > 0,8$ MeV) $3,3 \cdot 10^{13}$ n/(sm²·s)ni tashkil etdi. Kanaldagi

namunalarning nurlanish vaqti nurlanishning umumiy dozasi (neytron flyuyensi 10^{16} n/sm² dan 10^{20} n/sm² gacha) qarab ikki soatdan bir yilgacha bo'lgan. Bir nechta namunalari Rossiyaning Dubna shahridagi Birlashgan yadro tadqiqotlari institutidagi IBR-2 reaktori 3-gorizontaal kanalida nurlantirilgan. Bu reaktorning o'rtacha quvvati 2 MW, issiq neytronlar oqimining zichligi ($E \leq 0,625$ Ev) sekinlatgich yuzasidan: o'rtacha $\sim 10^{13}$ n/(sm²·s), maksimal impulsda $\sim 10^{16}$ n/(sm²·s) ni tashkil etgan. Ushbu namunalarni neytron nurlanishidan oldin va (10^{16} – 10^{18}) n/sm² nurlanishdan keyin alyuminiy qotishmasining holati va radiatsion shikastlanishi bo'yicha bir qator tadqiqotlar o'tkazildi. Xususan, yuklama mashinasi yordamida olingan mustahkamlikning makroskopik o'lchovlari bilan strukturaviy holatning korrelyatsiyasini aniqlash uchun hajmiy usullardan (rentgen difraksiyasi va neytron difraksiyasi) foydalanilgan. Alyuminiy qotishmalarida strukturaviy nuqsonlarni hosil qiluvchi gamma nurlanishining hissasini baholash tahlil qilindi. Reaktor nurlanishida gamma nurlanishining hissasi neytron nurlanishiga qaraganda 1%dan kam ekanligi aniqlandi. Strukturani o'lchash turli diametrlil va uzunlikdagi silindrsimon shaklga ega alyuminiy qotishma SAV-1ning sanoat tomonidan etkazib beriladigan namunalari amalga oshirildi. Namunalarning tuzilishini o'lchash ikkita qurilmada amalga oshirildi:

rentgen difraktometri – EMPYREAN PANalytical (Malvern, Worcestershire, United Kingdom) CoK_α nurlanish bilan ($\lambda = 1,78$ Å) yuza qismining strukturasi o'rganish uchun;

namunalarning ichki strukturasi o'rganish uchun Birlashgan yadro tadqiqotlari instituti (BYTI) Neytron Fizikasi laboratoriyasi IBR-2 reaktoring 11A kanalida (Rossiya, Dubna) maxsus yasalgan FSD Furye-difraktometridan foydalanilgan.

Namunalarning mikroqattiqligi va mustahkamligini o'lchashning turli usullari tahlil qilindi. Tanlangan Vickers metodi bo'yicha qattiqlikni o'lchash to'rt qirrali piramida shakliga ega bo'lgan olmos uchi yordamida amalga oshiriladi. O'rganilayotgan namuna yuk ta'sirida bosiladi va qattiqlik soni bosilayotgan yukning hosil bo'lgan piramida qoldirgan iz diagonalining kvadratiga nisbati bilan aniqlanadi. Tajribada izning diagonali uzunligi o'lchandi, H_{μ} qattiqlik yukning iz yuzasi maydoniga nisbati bilan aniqlanadi:

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

bu yerda P-piramidadagi yuk (N), H_{μ} – mikro qattiqlik (GPa), d – indikator izining diametri (mm).

Tajribalar xona haroratida namunalarga mexanik ta'sir ko'rsatish uchun mo'ljallangan bir o'qli yuklama mashinasida LoadMachine LM-20 (Chexiya) turli deformatsiya tezligida (PID sozlash) o'tkazildi. Mashinaning mexanik dizayni maksimal 20 kN gacha cho'zish va siqish xarakteridagi kuchlarni oshirish imkonini beradi. Mashinaning harakatlanuvchi qismlarini loyihalashning asosiy

afzalligi yukni namunaga deyarli ishqalanishsiz uzatishdir. Yukning qiymati 10 kN, motor qadami sekundiga 0,25 μm ni tashkil qiladi.

Dissertatsiyaning “**SAV-1 strukturasi tadqiq qilish**” deb nomlangan uchinchi bobida Empyrean rentgen difraktometri yordamida yadro reaktori tez neytronlari bilan nurlantirilgan SAV-1 namunasining elementar katak (yacheyka) parametrlari va fazaviy tarkibini o‘rganishning eksperimental natijalari keltirilgan. Rentgen nurlari – elektromagnit to‘lqinlar bo‘lib, ularning foton energiyasi ultrabinafsha nurlanish va gamma nurlanish (~ 10 eV dan ~ 1 MeV gacha) o‘rtasidagi elektromagnit to‘lqinlar shkalasida joylashgan bo‘lib, to‘lqin uzunligi $\sim 10^3$ dan $\sim 10^{-2}$ Å gacha ($\sim 10^{-7}$ dan $\sim 10^{-12}$ m gacha) bo‘lgan to‘lqin uzunliklariga to‘g‘ri keladi. Kristall moddalardagi rentgen nurlarining diffraksiyasi Vulf-Bregg formulasi bilan ifodalanadi:

$$2d \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda \quad (2)$$

bu yerda d – tekisliklar orasidagi masofa, θ – rentgen nurlari va namuna tekisligi orasidagi burchak, λ – rentgen nuri to‘lqin uzunligi, n – butun son.

Diffraksiya hodisasi faqat Vulf-Bregg sharti bilan aniqlangan ma’lum burchaklarda sodir bo‘ladi. Fizikaviy diffraksiya hodisasi rentgen nurlanishining nosimmetrik joylashgan maksimumlarining fotoplastinkada ko‘rinishida ifodalanadi, ularning kombinatsiyasi rentgenogramma yoki rentgen difraktogrammani hosil qiladi (diffraksiya tasvirini intensivlik I va $2\theta_B$ burchakga bog‘liqlik ko‘rinishida ifodalash). Asosiy xulosa: rentgen nurlarining diffraksiya tasvirilarida kuzatilgan simmetriya o‘rganilayotgan kristallarning simmetriyasiga to‘liq mos keladi. Rentgen nurlanishi kristall moddalarda o‘zaro ta’sirlashganda ikkilamchi nurlanishlar to‘plami hosil bo‘ladi: diffraksiyalangan, fluoressensiya (nurlatilganda yaltirab ko‘rinadigan), shaffof, issiqlik, fotoelektron va boshqalar. 1-jadvalda tekisliklararo masofa d va tasvir burchaklarini 2θ o‘lchash natijalari keltirilgan.

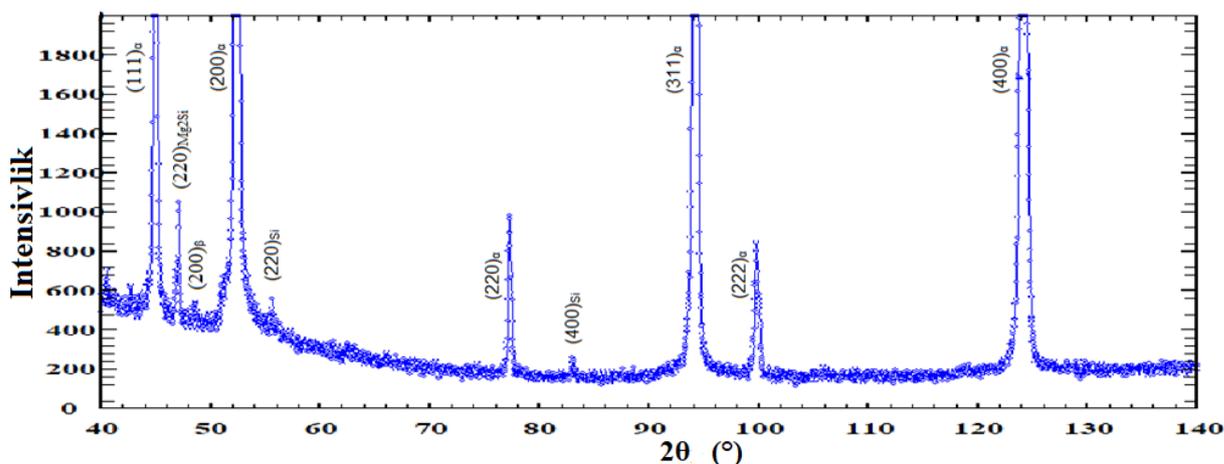
1-jadval

Rentgen nurlari diffraksiyasi

[20]-0 Burchak	[20]- Burchak 10^{16} n/sm ²	[20]- Burchak 10^{17} n/sm ²	[20]- Burchak 10^{18} n/sm ²	d- oraliq- 0 [Å]	d- oraliq [Å] - 10^{16} n/sm ²	d- oraliq [Å]- 10^{17} n/sm ²	d- oraliq [Å]- 10^{18} n/sm ²	hkl
44.9474	44.9696	44.9899	45.5216	2.34005	2.33895	2.33795	2.31207	111
52.3859	52.4123	52.4363	53.0690	2.02654	2.02559	2.02473	2.00231	200
77.2510	77.2938	77.3330	78.3632	1.43298	1.43231	1.43170	1.41585	220
94.1038	94.1614	94.2141	95.6040	1.22205	1.22148	1.22096	1.20744	311
99.7285	99.7921	99.8502	101.3873	1.17002	1.16948	1.16898	1.15603	222
123.9617	124.0625	124.1548	126.6258	1.01327	1.01280	1.01236	1.00116	400

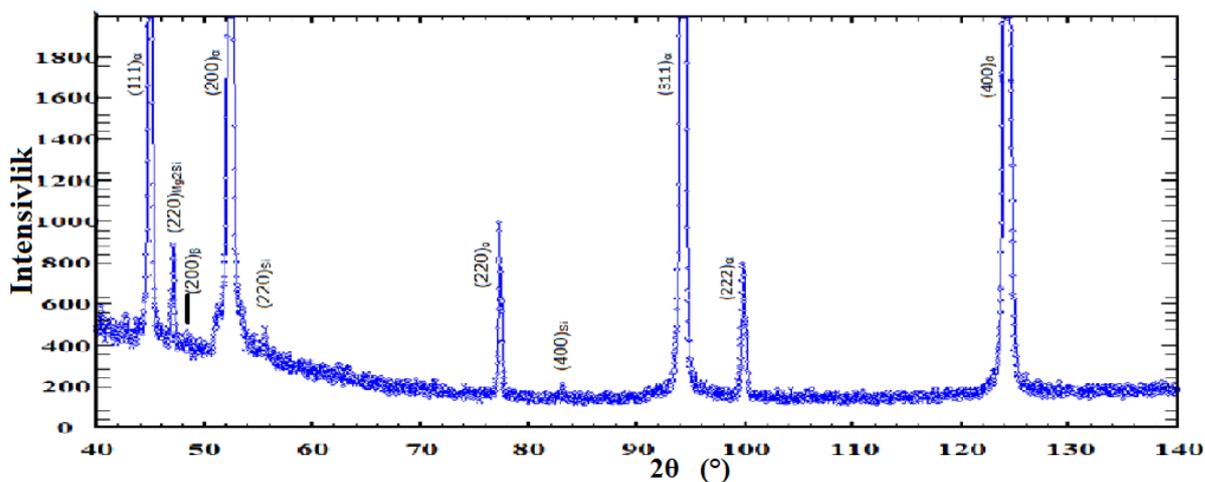
1-rasmda nurlantirilmagan SAV-1 qotishmasining diffraksiya diagrammalari ko‘rsatilgan, bu yerda alyuminiyning diffraksiya chiziqlari 111($2\theta_B=44,9474$), 200($2\theta_B=52,4123$), 220($2\theta_B=77,2510$) tekisliklarida aniq ko‘rinadi. Bundan tashqari, 220 tekislikda ($2\theta_B=46,5102$) Mg_2Si diffraksiya chizig‘ining ikkinchi

fazasi ko‘rinadi. $2\theta_B \sim 40$ da amorf Al_2O_3 plyonkasidan diffuziya aks etishi ko‘rinadi.



1-rasm. Nurlantirilmagan SAV-1 namunasining rentgen tasviri

2-rasmda ko‘rinib turibdiki, taxminan $2\theta_B \sim 40$ burchak ostida, amorf Al_2O_3 plyonkasidan diffuziya aks etishi kamayadi. Alyuminiyning diffraksiya chizig‘ining cho‘qqilari nurlantirilmagan namunalar bilan solishtirganda kattaroq darajaga siljidi, bu Vulf-Bregg formulasiga ko‘ra, rentgen to‘lqin uzunligi o‘zgarmasdan, tekisliklararo masofaning qisqarishini ko‘rsatadi. Bunday holda namunaning zichligi oshadi va oshish natijasida mikroqattqlik ham oshadi.

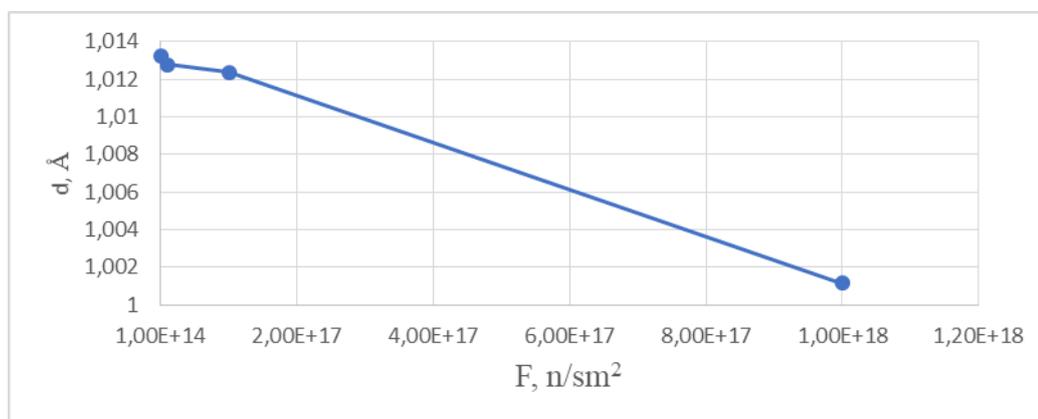


2-rasm. Nurlantirilgan ($F-10^{18} \text{ n/cm}^2$) SAV-1 namunasining rentgenogrammasi

Ma‘lumki, SAV-1 alyuminiy qotishmasi polikristal bo‘lib, kristall panjara taxminan 1-10 ming marta takrorlanadi, unda panjara sinishi (buzilishi) paydo bo‘ladi. Magniy atomlari odatda bu yoriqlarda joylashadi. Magniyning ion o‘lchami $0,71 \text{ \AA}$, shuning uchun u faqat kristall panjaraning yoriqlarida joylashgan. Nurlanish paytida kremniy atomlari alyuminiy atomlari orasida joylashgan bo‘lishi mumkin, chunki alyuminiy atomlari orasidagi o‘lcham (ion o‘lchami) $0,67 \text{ \AA}$ va kremniy esa $0,4 \text{ \AA}$ ga teng. Bu alyuminiy matritsa panjarasining siljishiga va

tekisliklararo masofaning kamayishiga, shuningdek, mikroqattqlikning oshishiga olib keladi.

3-rasmda tez neytronlar oqimiga qarab SAV-1 namunalari 400 tekisligida tekisliklararo masofani o'lchash natijalari ko'rsatilgan.



3-rasm. SAV-1 namunalarining 400 tekisligida tekisliklararo masofasini tez neytronlar oqimiga bog'liqligi

Tekisliklararo masofaning kamayishiga sabab – nurlanish jarayonida nuqsonlar (Frenkel juftlari) hosil bo'lishi, klasterlarning paydo bo'lishi va bu klasterlarning qirrali markazlashtirilgan kubsimon kristall panjara tekisligi orasidagi joylashishidir.

2-jadvalda tugunlararo masofalarni o'lchash natijalari ko'rsatilgan.

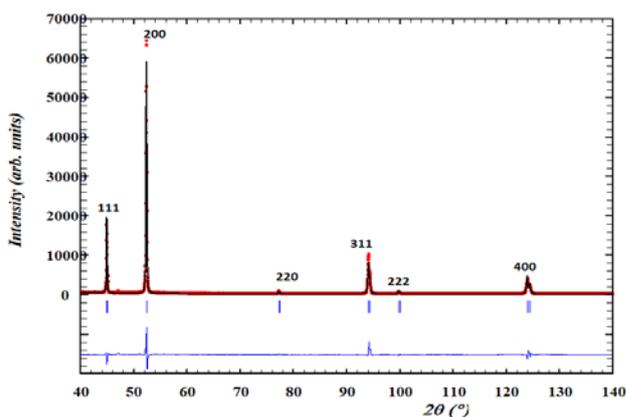
2-jadval

Tugunlararo masofalarni o'lchash natijalari

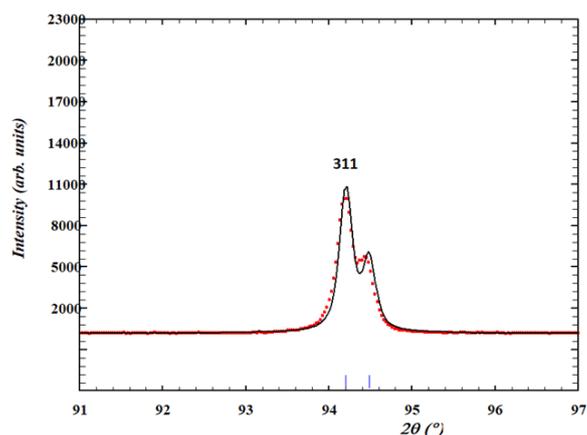
Al4.00	0	10 ¹⁶ n/sm ²	10 ¹⁷ n/sm ²	10 ¹⁸ n/sm ²
a/ Å	4.0531	4.0512	4.0495	4.0046

Jadvaldan ko'rinib turibdiki, tez neytronlarda nurlanish dozasining oshishi bilan SAV-1 namunalarining tugunlararo masofalari nuqsonlarning hosil bo'lishi va kristall panjaraning parametrlari o'zgarishi tufayli kamayadi.

EMPYREAN PANanalytical ko'p funksiyali difraktometr yordamida o'tkazilgan namunalarning rentgen nurlanishining fazaviy tahlili (RNFT) nurlanishdan oldin va keyin namunalar cho'qqilarining intensivligida sezilarli farqni aniqladi. 4-rasmda PANanalitik rentgen difraktometri yordamida olingan nurlantirilmagan SAV-1 namunalari (aks ettirilgan rentgen nurlari) aks ettirish intensivligining eksperimental natijalarini FullProf dasturi bilan modellashtirish natijalari bilan taqqoslash ko'rsatilgan. R-factor xatolar 7 %dan oshmaydi, masalan, № 3 namuna uchun R-factor xatosi 6,68 %, Rf-factor 4,43 %. 4-rasmdan ko'rinib turibdiki, olingan eksperimental ma'lumotlar hisoblangan natijalar bilan yaxshi mos keladi. Ko'k chiziqlar eksperimental ma'lumotlar va Rietveld usuli yordamida hisob-kitoblar o'rtasidagi farqdir.



4-rasm. Nurlantirilmagan namunalarning (SAV-1) diffraktogrammalari

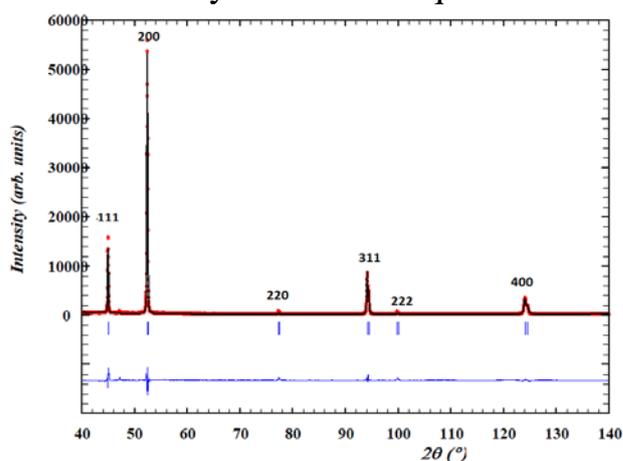


5-rasm. Nurlantirilgan (SAV-1, 10¹⁷ n/sm²) namunalarning diffraktogrammalari

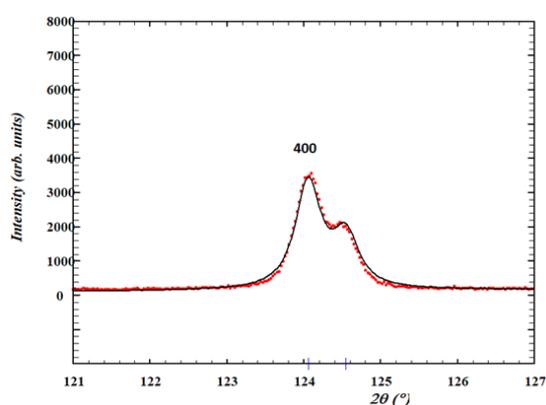
5-rasmda FullProf dasturida modellashtirish natijalari bilan PANanalytical rentgen diffraktometri yordamida olingan 10¹⁷ n/sm² tez neytron flyuensi (aks ettirilgan rentgen nurlanishi) bilan nurlantirilgan SAV-1 namunalarning aks ettirish intensivligining eksperimental natijalari taqqoslashlar ko'rsatilgan (qizil nuqtalar – tajriba natijalari, qora chiziq – Ritveld usuli yordamida model hisob-kitoblar).

6 va 7 rasmlarda FullProf dasturi model natijalari bilan PANanalytik rentgen diffraktometri yordamida olingan 10¹⁸ n/sm² tez neytron flyuensi (aks ettirilgan rentgen nurlanishi) bilan SAV-1 namunalari tomonidan nurlangan aks ettirish intensivligining eksperimental natijalarini taqqoslash ko'rsatilgan. 6-rasmdan ko'rinib turibdiki, olingan eksperimental ma'lumotlar hisoblanganlar bilan yaxshi mos keladi, qizil nuqtalar eksperimental ma'lumotlarning natijalari, qora chiziq Rietveld usuli yordamida eksperimental ma'lumotlarni modeli hisoblash natijalari.

SAV-1 namunasining elementar katak (yacheyka) parametrlari va fazaviy tarkibi yadro reaktorida tez neytronlar bilan nurlantirilgan Furye kuchlanish diffraktometri yordamida aniqlandi.



6-rasm. O'rganilayotgan namunalarning diffraktogrammasi

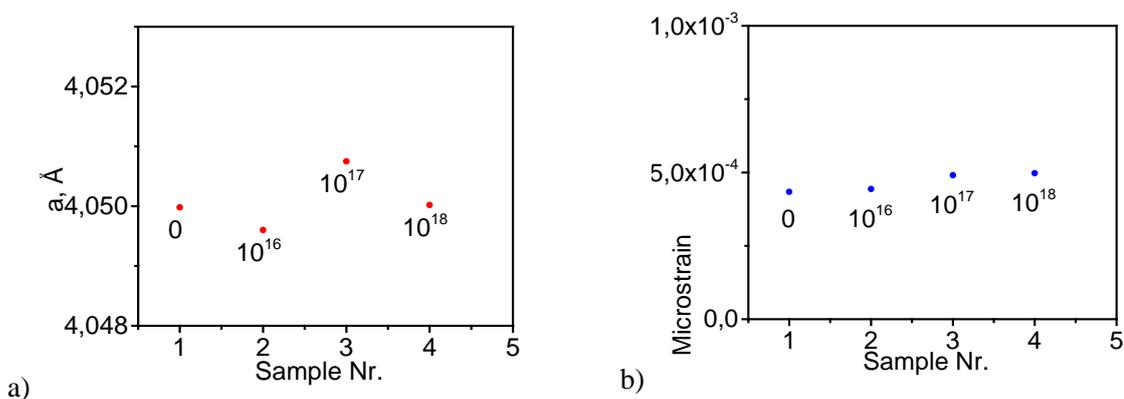


7-rasm. 400 tekislikda 10¹⁸ n/sm² tez neytronlar bilan nurlantirilgan SAV-1 namunalarning diffraktogrammasi

O'Ichangan diffraksiya spektrlari Pauli usuli yordamida qayta ishlandi, buning natijasida materialning kristall panjarasining parametrlari va choqqilar kengliklarining tekisliklararo masofaga bog'liqligi parametrlari aniqlandi (8-rasm).

Nurlanish dozalarining oshishi bilan tekisliklararo masofa kamayadi. Taxminan $2\theta_B \sim 124^\circ$ burchak ostida, 10^{18} n/sm² nurlanish dozasida tekisliklararo masofa va panjara parametri 1,2 %ga kamayadi. Tekisliklararo masofaning kamayishiga sabab nurlanish jarayonida nuqsonlar (Frenkel juftlari) hosil bo'lishi, klasterlarning paydo bo'lishi va bu klasterlarning yoqlari markazlashgan kubik panjara (YMKP) tekisligi orasidagi joylashishi.

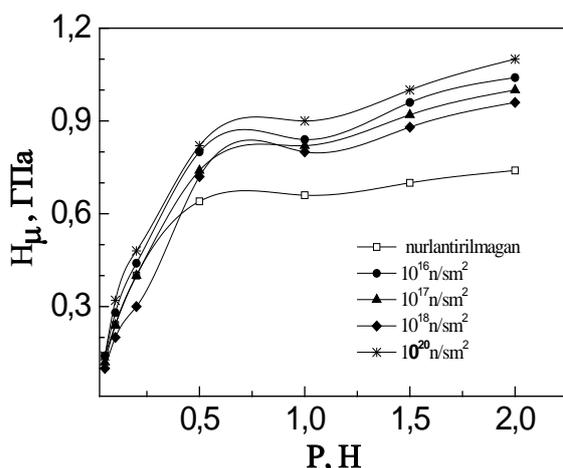
Rentgen strukturaviy fazaviy tahlili (RSFT) orqali biz tomondan olingan struktura parametrlari Full Prof dasturining hisoblangan ma'lumotlari bilan yaxshi mos keladi. (RSFT) material yuzasidagi o'zgarishlar aniqlanganligi sababli, bu usul o'Ichangan miqdorlarning hajmli tabiati tufayli neytron strukturaviy tahlilda (NST) amalda kuzatilmaydigan panjara parametrlaridagi o'zgarishlarni aniqlash imkonini beradi. Natijada, nurlanish dozasi oshishi bilan SAV-1 alyuminiy qotishmasining mustahkamlik xususiyatlari ortadi.



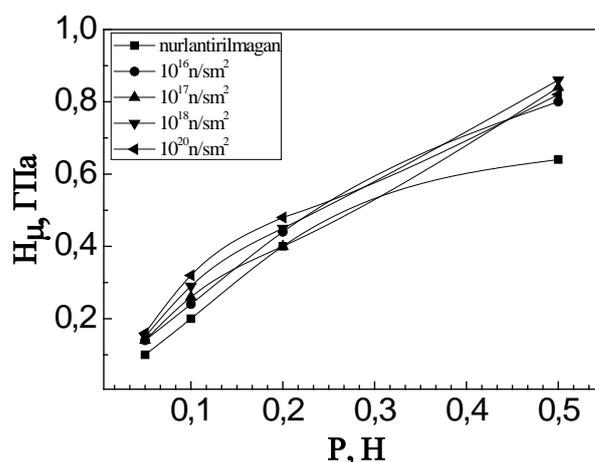
8-rasm. SAV-1 alyuminiy qotishmasi namunalari uchun kristall panjara parametrlari (a) va o'rtacha mikrodeformatsiya (b). Nurlantirilgan namunalarning olgan dozalari ko'rsatilgan

Dissertatsiyaning “SAV-1 va AMG-2 alyuminiy qotishmalarining mikroqattiqligi va mustahkamligini o'rganish” deb nomlangan to'rtinchi bobida neytron nurlanishidan oldin va keyin SAV-1 va AMG-2 qotishmalarining mikroqattiqligining harorat va nurlanish dozasi bog'liqligini o'rganish natijalari keltirilgan.

SAV-1 qotishmasining namunalari uchun mikroqattiqlikni o'lchash natijalari 9-rasmda (a, b) keltirilgan. Rasmdan ko'rinib turibdiki, H_μ (P)ning bog'liqligini shartli ravishda ikkita intervalga bo'lish mumkin: 0 dan 50 g gacha bo'lgan larda H_μ ning yukga keskin bog'liqligi kuzatiladi; yuk ortib borishi bilan H_μ (P) egri chiziqlar tekislanadi va to'yinganlikka erishadi.



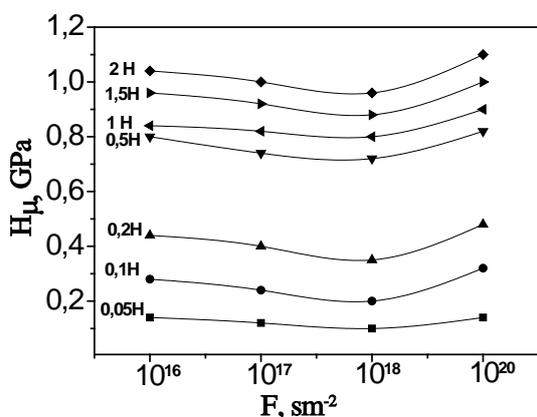
a)



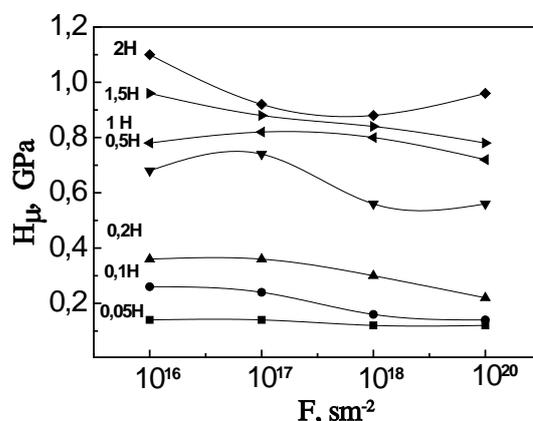
b)

9-rasm (a, b). SAV-1 qotishmasi namunalari ning mikroqattiqqligining yukga bogʻliqligi: (1) 10^{16} n/sm², (2) 10^{17} n/sm², (3) 10^{18} n/sm², (4) 10^{20} n/sm²

Yoriqlar mavjudligi va yuza qatlamining mustahkamligi pasayishi sababli, shuningdek, sirt qotib qolish ehtimoli tufayli, qoʻllaniladigan yukning oʻzgarishi olmos piramidasining turli fizik va kimyoviy xossalarga ega qatlamlarga kirib borishiga olib keladi. Tajribada olingan H_{μ} qiymatlari ushbu qatlamlar xossalari ning oʻziga xos xususiyatlarini aks ettiradi. 9 b-rasmda 50 g dan kam yuklarda $H_{\mu}(P)$ bogʻliqligi koʻrsatilgan. Shuni taʼkidlash mumkinki, mikroqattiqlik ayniqsa 10^{16} n/sm², 10^{17} n/sm² va 10^{20} n/sm² flyuyenslar bilan nurlantirilgan namunalar uchun P ortishi bilan kuchli ortadi. 10-rasmda SAV-1 qotishmasi namunalari ning H_{μ} ning qoʻzgʻalmas yukdagi neytron oqimiga bogʻliqligi koʻrsatilgan. Koʻrinib turibdiki, SAV-1 qotishmasi uchun $F=10^{18}$ n/sm² gacha, oqimning logarifmiga mutanosib ravishda mikroqattiqlikning pasayishi kuzatiladi, keyin esa oqimning yanada oshishi bilan H_{μ} ortadi. 11-rasmda AMG-2 qotishmasining nurlangan namunalari ning mikroqattiqqligining neytron oqimiga bogʻliqligi koʻrsatilgan.



10-rasm. SAV-1 qotishmasining nurlangan namunalari ning mikroqattiqqligining neytron oqimiga bogʻliqligi



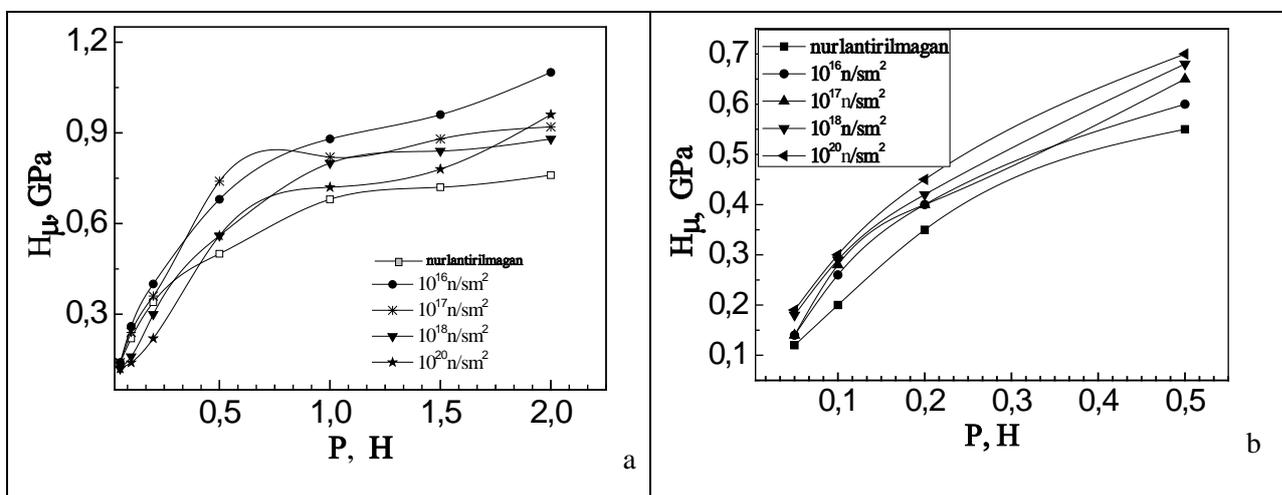
11-rasm. AMG-2 qotishmasining nurlangan namunalari ning mikroqattiqqligining neytron oqimiga bogʻliqligi

Turli hil neytron flyuyenslarida nurlantirilgan AMG-2 namunalarining mikroqattqlik qiymatlarini yuk (nagruzka)larga bog‘liqligi 12(a,b)-rasmda ko‘rsatilgan. H_{μ} yuk ortib borishi bilan ortadi, $P > 100$ g da juda zaif to‘yinganlikka o‘tadi. Shuni ta’kidlash kerakki, $P = 0,5$ N gacha, mikroqattqlik yukka taxminan proporsional ortadi, ya’ni $H_{\mu}(P)$ bog‘liqliklari deyarli chiziqli funksiya bilan tasvirlangan (12 b-rasm).

SAV-1 qotishmasining namunalaridan farqli o‘laroq, AMG-2 ning mikroqattqligi flyuyens oshib borishi bilan uzluksiz pasayadi, bu neytron oqimining logarifmiga chiziqli bog‘liqligini ko‘rsatadi. Mikroqattqlik xatti-harakatini tahlil qilib, nurlanish AMG-2 mikroqattqligining buzilishiga olib keladi.

Biz mikroqattqlikning neytron oqimiga bog‘lik o‘zgarishini topdik va quyidagi empirik formulani aniqladik:

$$H_{\mu} = -0,11 + 0,02 \cdot \ln F \quad (3)$$

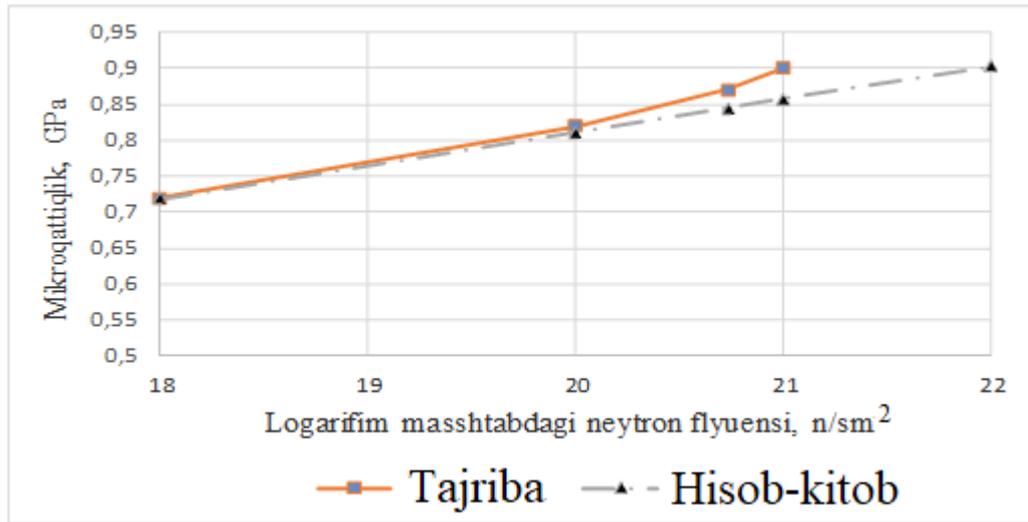


12-rasm (a, b). AMG-2 qotishma namunalarining mikroqattqligining yukga bog‘liqligi: (1) 10^{16} n/sm², (2) 10^{17} n/sm², (3) 10^{18} n/sm², (4) 10^{20} n/sm²

Ushbu formula reaktorda borish qiyin bo‘lgan joylardagi konstruksion materiallarning mikroqattqlik ma’lumotlarini H_{μ} ni strukturaning yaxlitligini yetarli darajada aniqlik bilan zarar yetkazmasdan aniqlash imkonini beradi. Buning uchun konstruksion materiallarning ma’lum bir nuqtasida neytron flyuyensini hisoblash orqali aniqlash kifoya.

Neytron nurlanishining yuqori dozalarida namunalarni H_{μ} mikroqattqligining eksperimental qiymatlari hisoblangan qiymatlariga yaxshi mos keladi.

13-rasm SAV-1 qotishmasining mikroqattqligi H_{μ} bo‘yicha eksperimental va hisoblangan ma’lumotlarining neytron flyuyenslariga (F) bog‘liqligi ko‘rsatilgan.



13-rasm. SAV-1 qotishmasining mikroqattiqligi H_{μ} bo'yicha eksperimental va hisoblangan ma'lumotlarning neytron flyuenslariga (F) bog'liqligi

Reaktor nurlanishi va radiatsiyaviy nuqsonlardan so'ng qotishmalarning katta hajmi bo'yicha mahalliy erimaydigan intermetalik fazalarning sezilarli darajada kamayishi (parchalanishi) va sochilishi, ehtimol, dislokatsiyalarning qo'shimcha qo'shilishiga olib keladi, bu esa namunalarning mikroqattiqligining oshishiga olib keladi.

SAV-1 oquvchanligining neytron flyuensiga bog'liqligi aniqlandi va 10^{16} n/sm² dan $3,5 \cdot 10^{22}$ n/sm² oralig'ida neytron flyuenslariga qarab SAV-1 namunalarning oquvchanligini hisoblash uchun empirik formula aniqlandi:

$$\sigma_{0.2} = 49,8097 \cdot F^{0,0322} \quad (4)$$

3-jadval

SAV-1 qotishmasining oquvchanlik chegarasining ($\sigma_{0.2}$) neytron flyuensiga (F) bog'liqligining eksperimental va hisoblangan ma'lumotlari

Flyuens, F, n/sm ²	Tajriba, $\sigma_{0.2}$, MPa	Hisob-kitob, $\sigma_{0.2}$, MPa
1,00E+16	180 (Ushbu ish)	151,47
1,00E+17	159 (Ushbu ish)	163,12
1,00E+18	162 (Ushbu ish)	175,68
1,00E+19		189,20
1,00E+20		203,76
1,00E+21	240	219,44
1,00E+22	255	236,33

3-jadvaldan SAV-1 alyuminiy qotishmasi oquvchanligi chegarasining flyuenslarda o'zgarishini ko'rishimiz mumkin: 10^{16} n/sm² dozada

oquvchanlikning chegarasining $\sigma_{0.2}$ keskin oshishi, 10^{17} n/sm² dozada oquvchanlik chegarasi $\sigma_{0.2}$ radiatsion otjig va Gunye-Preston zonalari tufayli kamayadi.

4-jadval

SAV-1 namunalarining IBR-2 reaktorida turli tez neytron flyuyenslarida nurlantirishdan oldin va keyin cho'zilish mexanik xususiyatlarining asosiy xarakteristikalari

Flyuyens, n/sm ²	σ_v , MPa	σ_o , MPa	$\sigma_{0.2}$, MPa	σ_{pr} , MPa	σ_{el} , MPa	S_q , MPa	δ , %	ψ , %	Adabiyotlar
0	160,4	154,8	154,3	108,6	117,9	147,4	18	15	Tadzhibaev D.P. va bosh.
0							16,5		Karasev V.S. va bosh. Moskva, 1989
0			162				16,4		Lebedev V.M. S.Peterburg, 2014
0	214,8		156,4						Hajewska E. Poland, 1993
0	225		155				18		Didenko V.I., Konoplev K.A.
10^{16}	190,7	185	180	83,4	110	119	16	16	Tadzhibaev D.P. va bosh. Yadro fizikasi va atom energiyasi. – Kiev (Ukraina), 2022
10^{17}	165	159	159	83,4	100	107	17	16	
10^{18}	175	162	162	84	105	110	13,5	7	
$0.5 \cdot 10^{21}$	290		210				16		Didenko V.I., Konoplev K.A., Poltavskiy A.S., Yakorev O.P., VVR-M va PIK tadqiqot yadro reaktorlari tuzilmalarining xizmat muddatini baholashning materialshunoslik muammolari /http://www.pnpi.nw.ru/nrd-arch/base/material.html
$0.83 \cdot 10^{21}$	310		240				11		
$1.37 \cdot 10^{21}$	350		295				7,3		
$2.43 \cdot 10^{21}$	340		315				2,5		
$1.9 \cdot 10^{22}$	277,6		255						Hajewska E. Poland, 1993.
$2.16 \cdot 10^{22}$			275.0				7.3		Lebedev V.M. va boshqalar Nano tadqiqotlar. SAV-1 qotishmasining tuzilishi, mintaqa. t.neytronlar... - Sankt-Peterburg, 2014
$2.78 \cdot 10^{22}$			261.7				6.7		
$3.13 \cdot 10^{22}$			282.9				5.8		
$3.48 \cdot 10^{22}$			275.8				5.1		Didenko V.I., Konoplev K.A. va bosh.
$3.5 \cdot 10^{22}$							2,5		Karasev V.S. va bosh. Moskva, 1989

3 va 4-jadvallarda nurlantirilmagan va 10^{16} , 10^{17} , 10^{18} n/sm² flyuyenslarda nurlantirilgan SAV-1 qotishmasining nisbiy uzayishi δ va qisqarishi ψ , uzulishga tabiiy qarshiligi S_q , elastiklik chegarasi σ_{el} , proportsionallik chegarasi σ_{pr} , oquvchanlik chegarasi (fizikaviy) σ_o , mustahkamlik chegarasi (vaqtinchalik qarshilik) σ_v , oquvchanlik chegarasi $\sigma_{0.2}$ kattaliklarining adabiyotlardagi va bizning

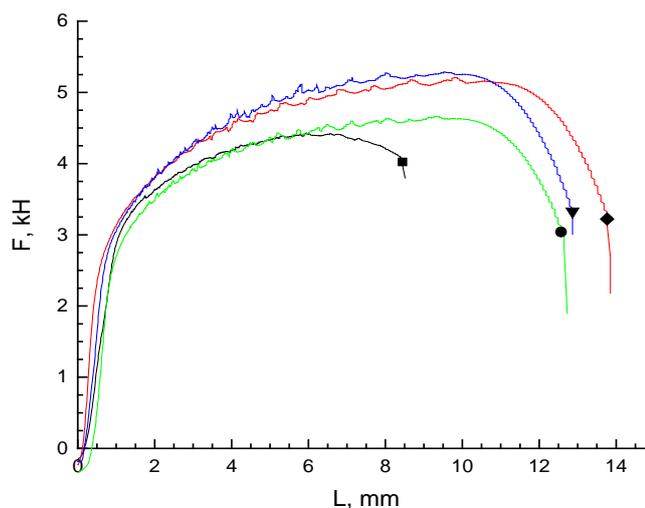
tajribalarimiz ma'lumotlari, shuningdek, 10^{19} n/sm², 10^{20} n/sm², 10^{21} n/sm² va 10^{22} n/sm² flyuyenslardagi oquvchanlik chegarasini $\sigma_{0.2}$ aniqlashda foydalanilgan emperik formula yordamida olingan hisob-kitoblar natijalari keltirilgan. Nurlantitilmagan namunalar bo'yicha olgan natijalarimiz 3 ta adabiyot ma'lumotlariga to'g'ri keladi.

14-rasmda ko'rsatilgan diagrammadan ko'rinib turibdiki, unda kilo nyutonlarda qo'llaniladigan kuch F vertikal o'q bo'ylab va gorizonttal o'q bo'ylab namunaning mutlaq cho'zilishi ΔL chizilgan. Bunday diagrammalar maxsus cho'zilish sinov mashinalarida namunalarni cho'zish natijalari asosida tuziladi. Olingan egri chiziq cho'zilgan namunaning mustahkamligini baholashga imkon beradi.

5-jadvalda yuqoridagi formula bo'yicha 10^{23} n/sm² flyuyensgacha bo'lgan mikroqattqlikning oquvchanlik chegarasiga bog'liqligini hisoblash natijalari ko'rsatilgan.

Biz 10^{16} n/sm² dan 10^{23} n/sm² gacha bo'lgan tez neytron flyuyenslari oralig'ida oquvchanlik chegarasining mikroqattqlik qiymatiga bog'liqlikni aniqladik:

$$\sigma_{0.2} = -3515.77H_{\mu}^3 + 9461.31H_{\mu}^2 - 8044.081H_{\mu} + 2358.82 \quad (5)$$



14-rasm. Cho'zilish diagrammasi: F - Oquvchanlik maydonida namunaning uzayishiga olib keladigan cho'zilish yuki (kN) (kuchi), L - uzilish momentidagi namunaning uzunligi. Namunalar: ■ - nurlantirilmagan; ◆ - 10^{16} n/sm²; ● - 10^{17} n/sm²; ▼ - 10^{18} n/sm²

5-jadvalda (5) formuladan foydalanib mikroqattqlik H_{μ} eksperimental ma'lumotlari bo'yicha aniqlangan oquvchanlik chegaralarining $\sigma_{0.2}$ hisoblangan ma'lumotlari keltirilgan. Olingan hisob-kitoblar tajriba ma'lumotlarga mos keladi: past dozalarda (10^{16} - 10^{19} n/sm²) ma'lumotlar orasidagi farq 2 %, yuqori dozalarda (10^{20} - 10^{23} n/sm²) – 5 % gacha. Ushbu ma'lumotlardan shuni aytishimiz mumkinki,

(5) formula H_{μ} mikroqattqlik ma'lumotlari orqali oquvchanlik chegarasini $\sigma_{0.2}$ aniqlashda juda muvaffaqiyatli yaratilgan.

5-jadval

10^{23} n/sm² flyuyensgacha bo'lgan mikroqattqlikning oquvchanlik chegarasiga bog'liqligini hisoblash natijalari

Flyuyens, n/sm ²	Tajriba, H_{μ} , GPa	Tajriba, $\sigma_{0.2}$, MPa	H_{μ} orqali $\sigma_{0.2}$ hisoblari, MPa
1,00E+16	0,8	180 (Ushbu ish)	178,72
1,00E+17	0,74	159 (Ushbu ish)	162,54
1,00E+18	0,72	162 (Ushbu ish)	159,57
1,00E+19	0,88		210,97
1,00E+20	0,9		219,81
1,00E+21	0,95	240	228,63
1,00E+22	1,2	255	241,44
1,00E+23			249,46

VVR-SM reaktori faol zonasidagi konstruksion material 2040-yil oxirlarida kutilayotgan flyuyensning maksimal qiymati $1.87 \cdot 10^{22}$ n/sm² dan oshmaydi.

XULOSA

Falsafa doktori (PhD) ilmiy darajasini olish uchun bajarilgan “Yadro reaktor konstruksion materiallari SAV-1 va AMG-2 larning strukturasi va mustahkamlik xarakteristikalariga neytron nurlanishining ta'siri” mavzusidagi dissertatsiya ishi asosida amalga oshirilgan tadqiqotlar doirasida quyidagicha xulosalar qilindi:

1. Yadro reaktorlarining konstruksion material SAV-1 qotishmasining yuza strukturasi neytronlarning ta'siri aniqlandi va SAV-1 namunalari 10^{18} n/sm² neytron flyuyensida nurlantirilganda Mg₂Si ning ikkinchi fazasining cho'qqisi intensivligi 16 %ga kamayishi birinchi marta rentgenogrammada aniqlandi.
2. Nurlanish dozasi 10^{18} n/sm² flyuyensgacha oshirilganda $2\theta_B \sim 124^\circ$ burchak yaqinida tekisliklararo masofa 1,0132 Å dan 1,0011 Å gacha kamayishi, hamda aks etish burchagi ($2\theta_B$) SAV-1 namunasidagi kremniy ionlarining alyumin tugunlararo bo'shliqda ko'chishi hisobiga oshishi aniqlandi.
3. Full Prof dasturining hisoblangan ma'lumotlari bilan yaxshi mos keladigan rentgenostrukturaviy fazaviy tahlili RSFT asosida struktura parametrlari aniqlandi. Shuningdek, (RSFT) material yuzasidagi o'zgarishlarni aniqlaganligi sababli, bu usul o'lchanayotgan qiymatlarning hajmiy xususiyati tufayli neytron strukturaviy tahlilda (NST) amalda kuzatilmaydigan panjara parametrlarining o'zgarishini aniqlash imkonini beradi.
4. SAV-1 va AMG-2 tipidagi alyuminiy qotishmalari namunalarining mikroqattqligi nurlanishdan oldin va 10^{16} n/sm² dan 10^{20} n/sm² gacha bo'lgan neytron flyuyenslarida nurlantirilgandan so'ng indentorda turli xil yuklamalarda aniqlandi va 10^{20} n/sm² flyuyensda nurlantirilganda

namunalarning kristal panjara parametrlarining o'zgarishi natijasida mikroqattiqligining SAV-1 namunalari 33 %ga, AMG-2 namunalari 10 %ga oshishiga olib kelishi birinchi marta aniqlandi.

5. Adabiyotlar va bizning tajriba ma'lumotlar o'rtasida taqqoslashlar o'tkazildi, nurlantirilmagan va 10^{16} n/sm², 10^{17} n/sm², 10^{18} n/sm² flyuyenslarda nurlantirilgan SAV-1 qotishmasining nisbiy uzayishi δ va qisqarishi ψ , uzulishga tabiiy qarshiligi S_q , elastiklik chegarasi σ_{el} , proporsionallik chegarasi σ_{pr} , oquvchanlik chegarasi (fizikaviy) σ_o , mustahkamlik chegarasi (vaqtinchalik qarshilik) σ_v , oquvchanlik chegarasi $\sigma_{0,2}$ kattaliklarining adabiyotlardagi va bizning tajribalarimiz ma'lumotlari va 10^{19} n/sm², 10^{20} n/sm², 10^{21} n/sm² va 10^{22} n/sm² flyuyenslardagi oquvchanlik chegarasini $\sigma_{0,2}$ aniqlashda foydalanilgan empirik formula yordamida olingan hisob-kitoblar natijalari keltirilgan. Nurlantirilmagan namunalardan olingan natijalarimiz 3 ta adabiyot ma'lumotlariga to'g'ri keladi.
6. Namunalarning oquvchanligi chegarasi va mikroqattiqligining flyuyenslarga bog'liqligini hisoblash uchun empirik formula olindi, shuningdek, 10^{16} n/sm² dan $3,5 \cdot 10^{22}$ n/sm² nurlanish dozalari oralig'ida SAV-1 namunalari uchun mikroqattqlik bilan oquvchanlik chegarasi o'rtasida bog'liqlik aniqlandi.

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

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

ТАДЖИБАЕВ ДИЕР ПУЛАТОВИЧ

**ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И
ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ САВ-1 И АМГ-2 ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

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

Ташкент – 2023

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за номером № B2023.4.PhD/FM184

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) и информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный руководитель:	Байтелесов Сапар Акимович доктор технических наук, старший научный сотрудник
Официальные оппоненты:	Ахмеджанов Фарход Рашидович доктор физико-математических наук, доцент
	Муссаева Малика Анваровна доктор физико-математических наук старший научный сотрудник
Ведущая организация:	Институт ядерной физики Министерства энергетики Республики Казахстан

Защита диссертации состоится «___» _____ 2023 года в ___ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики (Адрес: 100214, г. Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ АН РУз. Тел.: (+99871) 289-31-41; факс: (+99871)289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ядерной физики (регистрационный номер _____) (Адрес: 100214, г. Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ АН РУз. Тел. (+99871) 289-31-19).

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2023 г.
(протокол рассылки № _____ от «___» _____ 2023 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.,
старший научный сотрудник

Э.М.Турсунов
председатель научного семинара
при Научном совете по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время в исследовательских ядерных реакторах необходимую механическую прочность, конструктивную компоновку основных узлов обеспечивают конструкционные материалы. Под действием нейтронного излучения в конструкционных материалах ядерных реакторов происходят структурные и фазовые превращения, которые существенно изменяют их физические и механические свойства, а также могут приводить к радиационному охрупчиванию, радиационной ползучести и радиационному распуханию. Изменения этих свойств под действием излучения оказывают значительное влияние на конструкцию, эксплуатационные характеристики и безопасность реактора. Поэтому вопросы радиационной стойкости конструкционных материалов приобретают все более важное значение при определении срока эксплуатации исследовательских ядерных реакторов.

В настоящее время в качестве конструкционных материалов в активной зоне большинства исследовательских реакторов используются сплавы алюминия САВ-1 и АМГ-2. Прочность бака активной зоны и опорной решетки является важным параметром, который обеспечивает компоновку активной зоны реактора и предохраняет конструкцию. Измерение прочности и структуры конструкционных материалов является технически сложной задачей, они обладают высокой бета- и гамма- активностью. Некоторые конструкционные материалы исследовательского ядерного реактора ВВР-СМ используются более 60-ти лет без замены. В связи с этим определение закономерности эволюции прочностных параметров в зависимости от флюенса быстрых нейтронов и определение взаимозависимости этих закономерностей является актуальной задачей. После перехода на низкообогащенное топливо масса тепловыделяющей сборки (ТВС) увеличилась более чем на 1 килограмм на каждую ТВС, и это привело к увеличению нагрузки на конструкционные материалы.

В Республике уделяется большое внимание использованию ядерной энергии в мирных целях, а также проведению фундаментальных и прикладных исследований в этом направлении на мировом уровне. Направления этих фундаментальных исследований, имеющих большое значение для развития науки нашей страны и атомной энергетики для практического применения, отражены в Стратегии² развития Нового Узбекистана на 2022-2026 гг., а также в Концепции развития атомной энергетики в Республике Узбекистан на период 2019-2029 гг.

Исследования, проведенные в данной диссертационной работе, в определенной степени соответствуют задачам, предусмотренным в Указах Президента Республики Узбекистан № УП-60 «О стратегии развития Нового

²Указ Президента Республики Узбекистан № УП-60 «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022–2026 гг.» от 28 января 2022 г.

Узбекистана на 2022-2026 годы» от 28 января 2022 года, № УП-3698 «О дополнительных мерах по совершенствованию механизмов внедрения инноваций в отрасли и сферы экономики» от 7 мая 2018 года, № УП-4165 «Об утверждении концепции развития атомной энергетики в Республике Узбекистан на период 2019-2029 годов» от 7 февраля 2019 г., Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП-3682 «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы практического внедрения инновационных идей, технологий и проектов» от 27 апреля 2018 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данном направлении.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Диссертационное исследование проведено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий в республике П. «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

Степень изученности проблемы. Исследования радиационной стойкости различных конструкционных материалов для исследовательских ядерных реакторов, а также влияния облучения (более 0,8 МэВ) на характеристики ядерных топливных элементов проводились ведущими учеными научно-исследовательских центров мира, в том числе американскими (Y.S. Kim, A. Yasout), российскими (В.М. Лебедев, С.П. Орлов, А.Л. Ижутов, К.А. Коноплев, С.Р. Фридман, С.Н. Вотинков), 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 (И. Абдукадырова, С.А. Байтелесов и Ш.А. Аликулов) и другими специалистами.

В результате этих исследований установлено, что облучение быстрыми нейтронами (более 0,8 МэВ) изменяет прочностные свойства, коррозионную стойкость конструкционных материалов; обнаружен эффект ускорения старения сплава САВ-1 под действием высокого флюенса нейтронного облучения ($1,3 \cdot 10^{22}$ н/см²) при температуре 353 К, выражающийся в образовании в материале множественных строчечных зон Гинье-Престона; показано, что прочностные свойства сплава САВ-1 зависят как от дозы облучения, так и от температуры радиационного нагрева. Однако структурные изменения под действием быстрых нейтронов изучены недостаточно.

В связи с важностью определения безопасного срока эксплуатации конструкционных материалов исследовательских ядерных реакторов, на сегодняшний день очень важно изучение механизма воздействия нейтронного облучения на структуру и прочностные свойства конструкционных материалов сплавов САВ-1 и АМГ-2 в ядерных реакторах типа ВВР-СМ. Изменения структурных и прочностных свойств сплавов САВ-1 и АМГ-2 в зависимости от флюенса быстрых нейтронов изучены недостаточно, имеются данные только при нескольких значениях флюенса,

поэтому прогнозирование изменения этих свойств является актуальной задачей физики конденсированного состояния.

Связь темы диссертационного исследования с научно-исследовательскими работами научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках научно-исследовательских проектов Института ядерной физики АН РУ по темам: ФА-Ф2-Ф070+Ф075 «Исследования специфических электрических, тепловых и механических свойств реакторных материалов и высокотемпературных сверхпроводников» (2007 – 2011), Ф2-ФА-Ф112 «Экспериментальное исследование свойств и состояний ядерной материи при высоких и низких энергиях» (2012–2016).

Целью исследования является анализ воздействия нейтронного облучения на структуру и прочностные характеристики сплавов САВ-1 и АМГ-2.

Задачи исследования:

провести анализ влияния нейтронов на поверхностную и объемную структуру сплава САВ-1;

измерить микротвердости образцов алюминиевых сплавов САВ-1 и АМГ-2 до и после облучения флюенсами нейтронов от 10^{16} н/см² до 10^{20} н/см² при различных нагрузках на индентор;

определить вклад влияния нейтронного облучения на ряд прочностных характеристик конструкционных материалов ядерных реакторов из сплава САВ-1;

провести анализ и выявить закономерности изменения микротвердости и прочности алюминиевых сплавов в зависимости от величины флюенса быстрых нейтронов;

определить взаимосвязь микротвердости с пределом текучести образцов САВ-1 в диапазоне от 10^{16} н/см² до $3,5 \cdot 10^{22}$ н/см².

Объектом исследования являются образцы конструкционных материалов алюминиевых сплавов АМГ-2 и САВ-1, различающиеся процентным содержанием примесей.

Предметом исследования являются структура и прочность алюминиевых сплавов АМГ-2 и САВ-1 в зависимости от флюенса быстрых нейтронов.

Методы исследования. Для определения микротвердости использовали стандартный прибор (ПМТ-3), прочностные величины сплава определялись нагрузочной машиной (LM-20). Для исследования структуры были проведены эксперименты по дифракции нейтронов на Фурье-стресс-дифрактометре и по дифракции рентгеновских лучей на многофункциональном рентгеновском дифрактометре EMPYREAN.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые определено уменьшение на 16% интенсивности отражения пика второй фазы Mg_2Si в рентгенограмме образцов САВ-1 при флюенсе нейтронов 10^{18} н/см²;

показано, что с увеличением дозы облучения до 10^{18} н/см² при угле около $2\theta_B \sim 124^\circ$ межплоскостное расстояние уменьшается от 1,0132 Å до 1,0011 Å, при этом угол отражения ($2\theta_B$) увеличивается за счет перемещения ионов кремния в междоузельном пространстве САВ-1;

показано, что изменение параметров кристаллической решетки приводит к увеличению микротвердости образцов САВ-1 на 33% и АМГ-2 на 10% при флюенсе нейтронов 10^{20} н/см²;

получена эмпирическая формула для расчета предела текучести и микротвердости образцов в зависимости от флюенса нейтронов, а также определена взаимосвязь микротвердости с пределом текучести для образцов САВ-1 в диапазоне от 10^{16} до $3,5 \cdot 10^{22}$ н/см².

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

рентгеноструктурным фазовым анализом определены изменения параметров кристаллической решетки, которые хорошо согласуются с расчётными данными по программе FullProf;

определено, что с увеличением дозы облучения при флюенсе нейтронов 10^{16} н/см² и выше возрастают прочностные характеристики сплава алюминия САВ-1.

Достоверность полученных результатов обеспечивается комплексным подходом к расчетно-экспериментальным исследованиям, большим объемом выполненных экспериментов, использованием хорошо апробированных современных методов измерения, корректностью и физической обоснованностью поставленных задач, а также согласованностью экспериментальных результатов с фундаментальными законами и основными положениями радиационной физики, непротиворечивостью полученных результатов и выводов с результатами других авторов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов заключается в том, что впервые было определено, что в результате изменения параметров кристаллической решетки при нейтронном облучении увеличивается микротвердость образцов САВ-1 и АМГ-2 в зависимости от флюенса быстрых нейтронов в диапазоне от 10^{16} н/см² до $3,5 \cdot 10^{22}$ н/см². Эти результаты дают возможность оценить запас прочности конструкционных материалов, что гарантирует безопасную эксплуатацию реактора.

Практическая значимость результатов исследования определяется их востребованностью при определении срока эксплуатации действующих исследовательских ядерных реакторов, а также при создании новых радиационно-стойких конструкционных материалов с улучшенными параметрами для ядерных установок.

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

определенное уменьшение на 16% интенсивности отражения пика второй фазы Mg_2Si в рентгенограмме образцов САВ-1 при флюенсе нейтронов 10^{18} н/см²; обнаруженный эффект, который показывает, что с увеличением дозы облучения до 10^{18} н/см² при угле около $2\theta_B \sim 124^\circ$ межплоскостное расстояние уменьшается от 1,0132 Å до 1,0011 Å использованы на исследовательском ядерном реакторе ВВР-К (письмо Института ядерной физики Министерства энергетики Республики Казахстан № 34-15.08-12/1359 от 16 ноября 2023г.). Использование результатов позволило определить структурные и прочностные свойства сплавов САВ-1 в конструкционных материалах реактора ВВР-К;

изменение параметров кристаллической решетки, приводящее к увеличению микротвердости образцов САВ-1 на 33% и АМГ-2 на 10% при флюенсе нейтронов 10^{20} н/см²; полученная эмпирическая формула для расчета предела текучести и микротвердости образцов в зависимости от флюенса нейтронов использованы в Институте ядерной физики АН РУз (Письмо Академии наук РУз № 2/1255-2519 от 28 ноября 2023г.). Использование результатов позволило определить сроки замены и оценить запас прочности конструкционных материалов реактора ВВР-СМ.

Апробация результатов исследования. Результаты исследования были обсуждены на 11 международных и республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 18 научных работ, в том числе 6 статей в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, из них 5 статей в зарубежных научных журналах.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 102 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, определены объект, предмет и методы исследования. Показана связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике. Изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их научная и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также о структуре диссертации.

В первой главе диссертации «Физико-химические характеристики алюминиевых сплавов» приводится обзор литературных данных о составе, структуре и свойствах алюминиевых сплавов, используемых в качестве конструкционных материалов в научных исследовательских реакторах, а

также результаты исследования влияния нейтронного облучения ($E_n > 0,8$ МэВ) на структуру и свойства алюминиевых сплавов САВ-1 и АМГ-2. Их физические свойства зависят в основном от соотношения концентрации в них алюминия и основных легирующих элементов – магния, кремния. Анализ литературных данных показывает, что нет систематического анализа зависимости свойств от флюенса нейтронов в диапазоне (10^{16} - 10^{20}) н/см². На основе анализа литературных данных определена нерешенная проблема установления механизма воздействия нейтронного облучения на структуру и прочностные свойства конструкционных материалов сплавов САВ-1 и АМГ-2, сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава диссертации **«Объекты исследования и методика экспериментов»** посвящена характеристике объектов исследования - конструкционным алюминиевым сплавам САВ-1 и АМГ-2.

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

Использовался вертикальный канал 3-2 в активной зоне реактора. Плотность потока быстрых нейтронов ($E_n > 0,8$ МэВ) в канале составляла $3,3 \cdot 10^{13}$ н/(см²·с). Время выдержки образцов в канале в зависимости от суммарной дозы облучения (флюенсы нейтронов от 10^{16} н/см² до 10^{20} н/см²) варьировалось от двух часов до года. Несколько образцов облучались на реакторе ИБР-2 (ОИЯИ, Дубна, Россия) в горизонтальном канале №3. Средняя мощность реактора 2МВт, плотность потока тепловых нейтронов ($E \leq 0,625$ эВ) с поверхности замедлителя: усредненная по времени $\sim 10^{13}$ н/(см²·с), максимум в импульсе $\sim 10^{16}$ н/(см²·с).

С этими образцами проведен ряд исследований состояния и радиационных повреждений сплава алюминия до и после облучения нейтронами дозами (10^{16} – 10^{18}) н/см². В частности, объемными методами (дифракция рентгеновского излучения и дифракция нейтронов) с целью определения корреляции структурного состояния с макроскопическими измерениями прочности, полученными с помощью нагрузочной машины. Анализирована оценка вклада гамма-излучения на генерирование дефектов структуры в сплавах алюминия. Обнаружено, что доля гамма-излучения при реакторном облучении составляет меньше 1%.

Измерения структуры проводились на образцах алюминиевого сплава САВ-1 промышленной поставки, имеющих цилиндрическую форму с разными диаметрами и длинами, на двух установках:

рентгеновский дифрактометр – EMPYREAN PANanalytical (Malvern, Worcestershire, United Kingdom) с излучением $\text{CoK}\alpha$ ($\lambda = 1,78$ Å) для исследования поверхностных напряжений; для исследования внутренних напряжений образцов на канале №11А реактора ИБР-2 в ЛНФ ОИЯИ (Россия, Дубна) использовали специализированный созданный фурье-дифрактометр ФСД.

Проанализированы различные методики измерений микротвердости и прочности образцов. Выбрано измерение твердости по Виккерсу, которое производят при помощи алмазного наконечника, имеющего правильную форму четырехгранной пирамиды. Испытуемый образец под действием нагрузки вдавливают, и число твердости определяют путем деления нагрузки на площадь боковой поверхности полученного пирамидального отпечатка.

При испытании измеряли длину диагонали отпечатка, твердость H_{μ} определялась отношением нагрузки к площади поверхности отпечатка:

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

где P – нагрузка на пирамиду (Н), H_{μ} – микротвердость (ГПа), d – диаметр отпечатка индикатора (мм).

Эксперименты проводились при комнатной температуре на одноосной нагрузочной машине, предназначенной для создания механических воздействий на образец LoadMachine LM-20 (Чехия) при различной скорости деформации (ПИД регулировка).

Механическая конструкция машины позволяет развивать усилия как растягивающего, так и сжимающего характера до максимальной величины 20 кН. Основным достоинством конструкции подвижных частей машины является практически безлюфтовая передача нагрузки на образец. Величина нагрузки выбрана 10 кН, шаг мотора - 0.25 мкм в секунду.

В третьей главе диссертации «**Исследование структуры САВ-1**» представлены экспериментальные результаты исследований параметров элементарной ячейки и фазового состава образца САВ-1, облученного быстрыми нейтронами ядерного реактора, на рентгеновском дифрактометре Empyrean.

Дифракция рентгеновского излучения в кристаллических веществах описывается формулой Брэгга-Вульфа:

$$2d \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda \quad (2)$$

где d – межплоскостное расстояние, θ – угол между пучком рентгеновских лучей и плоскостью образца, λ – длина волны рентгеновского излучения, n – целое число.

Явление дифракции возникает лишь на некоторых углах, определяемых условием Брэгга-Вульфа. Физически явление дифракции выражается в возникновении на фотопластинке симметрично расположенных максимумов рентгеновского излучения, совокупность которых формирует рентгенограмму либо рентгеновскую дифрактограмму (в случае представления дифракционной картины в виде зависимости интенсивности I и угла отражения 2θ). Главный вывод: симметрия, наблюдаемая на рентгенограммах, полностью соответствует симметрии исследуемых кристаллов. При взаимодействии рентгеновского излучения в кристаллических веществах образуется совокупность вторичного излучения: дифрагированное, флуоресцентное, просвечивающее, тепловое,

фотоэлектронное и др. В таблице 1 приведены результаты измерения межплоскостных расстояний d и углов отражения 2θ .

Таблица 1

Рентгеновская дифракция

Угол [2 θ]-0	Угол [2 θ]-10 ¹⁶ н/см ²	Угол [2 θ]-10 ¹⁷ н/см ²	Угол [2 θ]-10 ¹⁸ н/см ²	d-расст. - 0 [Å]	d-расст. [Å] - 10 ¹⁶ н/см ²	d-расст. [Å] - 10 ¹⁷ н/см ²	d-расст. [Å] - 10 ¹⁸ н/см ²	hkl
44.9474	44.9696	44.9899	45.5216	2.34005	2.33895	2.33795	2.31207	111
52.3859	52.4123	52.4363	53.0690	2.02654	2.02559	2.02473	2.00231	200
77.2510	77.2938	77.3330	78.3632	1.43298	1.43231	1.43170	1.41585	220
94.1038	94.1614	94.2141	95.6040	1.22205	1.22148	1.22096	1.20744	311
99.7285	99.7921	99.8502	101.3873	1.17002	1.16948	1.16898	1.15603	222
123.9617	124.0625	124.1548	126.6258	1.01327	1.01280	1.01236	1.00116	400

На рисунке 1 приведены дифракционные диаграммы необлученного сплава САВ-1, где четко видны в плоскостях 111($2\theta_B=44,9474$), 200($2\theta_B=52,4123$), 220($2\theta_B=77,2510$) дифракционные линии алюминия. Кроме того, в плоскости 220($2\theta_B=46,5102$) видна вторая фаза дифракционной линии Mg_2Si . В $2\theta_B \sim 40$ видно диффузионное отражение из аморфной пленки Al_2O_3 .

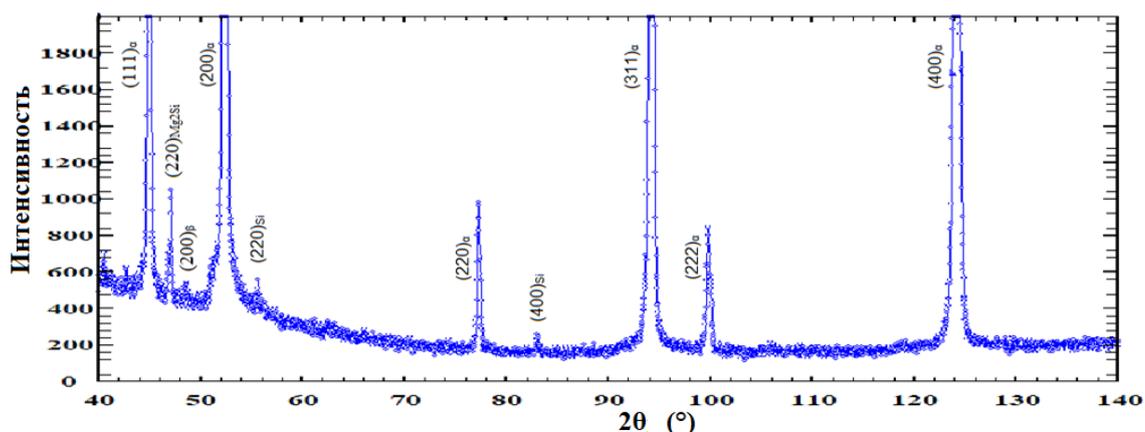


Рис. 1. Рентгеновская съемка необлученного образца САВ-1

На рисунке 2 видно, что при угле около $2\theta_B \sim 40$ диффузионное отражение из аморфной пленки Al_2O_3 уменьшается. Пики дифракционной линии алюминия сместились в сторону больших градусов в сравнении с необлучёнными образцами, что показывает по формуле Брэгга-Вульфа при неизменении рентгеновской длины волны сокращается межплоскостное расстояние. При этом увеличивается плотность образца и, в результате, микротвердость тоже увеличивается.

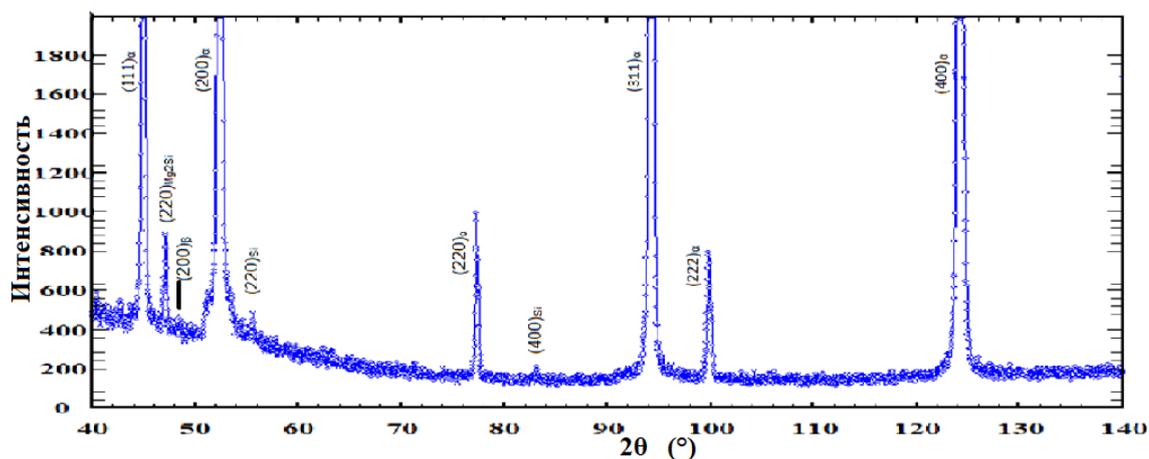


Рис. 2. Рентгеновская съемка облученного ($\Phi=10^{18}$ н/см²) образца САВ-1

Как известно, алюминиевый сплав САВ-1 является поликристаллом, в котором в результате многотысячного повторения кристаллической решетки появляются разломы (разрушения) решетки, атомы магния обычно располагаются в этих разломах. Ионный размер магния 0,71 Å, поэтому он располагается только в разломах кристаллической решетки.

При облучении атомы кремния могут располагаться между атомами алюминия, так как размер между атомами алюминия (ионный размер) 0,67 Å, а кремния 0,4 Å. Это приводит к смещению матричной решетки алюминия и уменьшению межплоскостного расстояния, а также к увеличению микротвёрдости.

На рисунке 3 приведены результаты измерений межплоскостного расстояния в плоскости 400 образцов САВ-1 в зависимости от флюенса быстрых нейтронов.

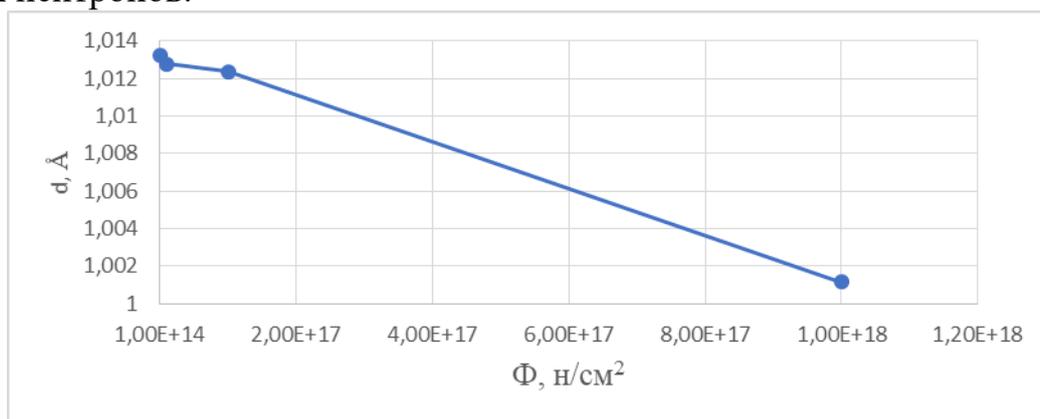


Рис. 3. Результаты измерений межплоскостного расстояния в плоскости 400 образцов САВ-1 в зависимости от флюенса быстрых нейтронов

Причина уменьшения межплоскостного расстояния - образование дефектов (пар Френкеля) при облучении, возникновение кластеров и расположение этих кластеров между плоскостью гранецентрированной кубической решетки (ГЦК).

В таблице 2 приведены результаты измерений междоузельных расстояний.

Таблица 2
Результаты измерений междоузельных расстояний

Al _{4.00}	0	10 ¹⁶ н/см ²	10 ¹⁷ н/см ²	10 ¹⁸ н/см ²
a/ Å	4.0531	4.0512	4.0495	4.0046

Как видно из таблицы, при увеличении дозы облучения быстрыми нейтронами уменьшаются междоузельные расстояния образцов САВ-1 за счет образования дефектов и разрушения кристаллической решетки.

Рентгеноструктурный фазовый анализ (РСФА) образцов, проведенный с использованием многофункционального дифрактометра EMPYREAN PANanalytical выявил существенную разницу в интенсивности пиков образцов до и после облучения. На рисунке 4 представлено сравнение экспериментальных результатов интенсивности рефлексов необлучённых образцов САВ-1 (отраженное рентгеновое излучение), полученные с использованием установки рентгеновского дифрактометра PANanalytical с результатами моделирования программой FullProf. Ошибки R-factor не превышают 7%, например, у образца №3 ошибки R-factor - 6,68%, Rf-factor - 4,43%. Как видно из рисунка 4, полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными. Синие линии - это разница между экспериментальными и расчетными по методу Ритвельда данными.

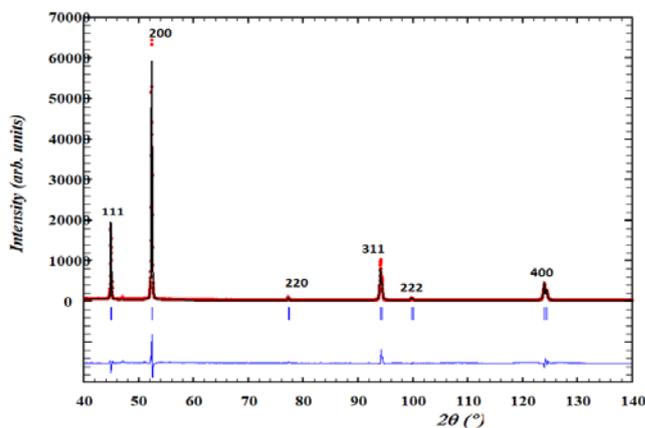


Рис. 4. Дифрактограмма необлученных образцов САВ-1

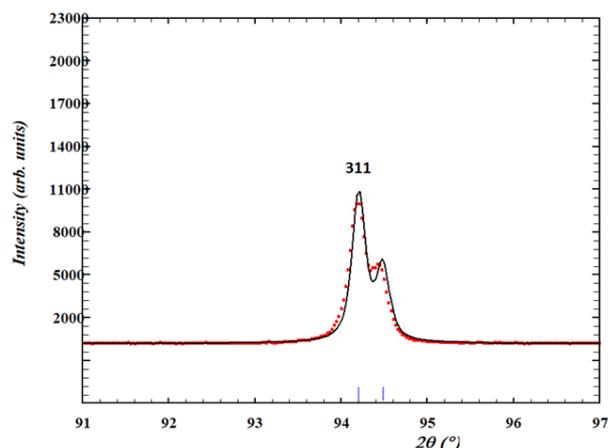


Рис. 5. Дифрактограмма облучённых (10¹⁷ н/см²) образцов САВ-1

На рисунке 5 представлено сравнение экспериментальных результатов интенсивности рефлексов облучённых образцов САВ-1 флюенсом быстрых нейтронов 10¹⁷ н/см², полученных на рентгеновском дифрактометре с результатами моделирования по программе FullProf (красные точки - результаты экспериментальных данных, черные линии - результаты модельного расчета по методу Ритвельда).

На рисунках 6 и 7 сравниваются экспериментальные результаты интенсивности рефлексов облучённых флюенсом быстрых нейтронов 10^{18} н/см² образцов САВ-1, полученные на рентгеновском дифрактометре, с результатами моделирования по программе FullProf. Как видно из рисунка 6, полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными.

Определены параметры элементарной ячейки и фазовый состав облученных быстрыми нейтронами в ядерном реакторе образцов САВ-1 с использованием установки Фурье-стресс-дифрактометр.

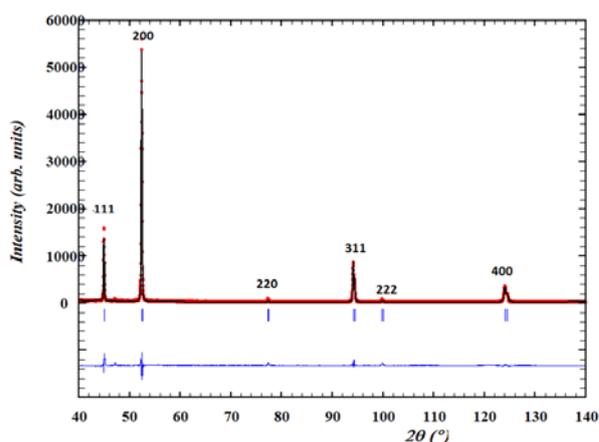


Рис. 6. Дифрактограмма исследованных образцов

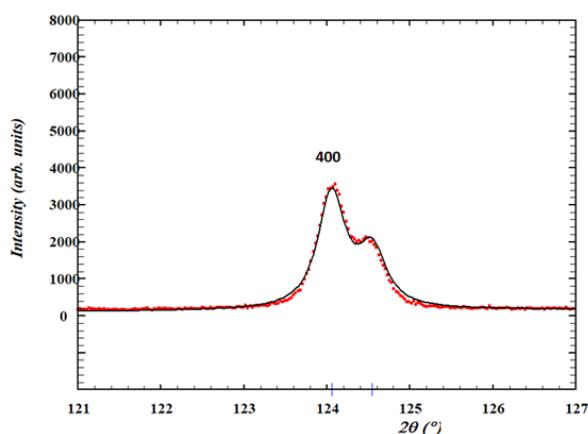


Рис. 7. Дифрактограмма исследованных образцов САВ-1, облучённых флюенсом быстрых нейтронов 10^{18} н/см² в плоскости 400

Измеренные дифракционные спектры были обработаны по методу Паули, в результате чего были определены параметры кристаллической решетки материала и параметры зависимости ширин пиков от межплоскостного расстояния (рис. 8).

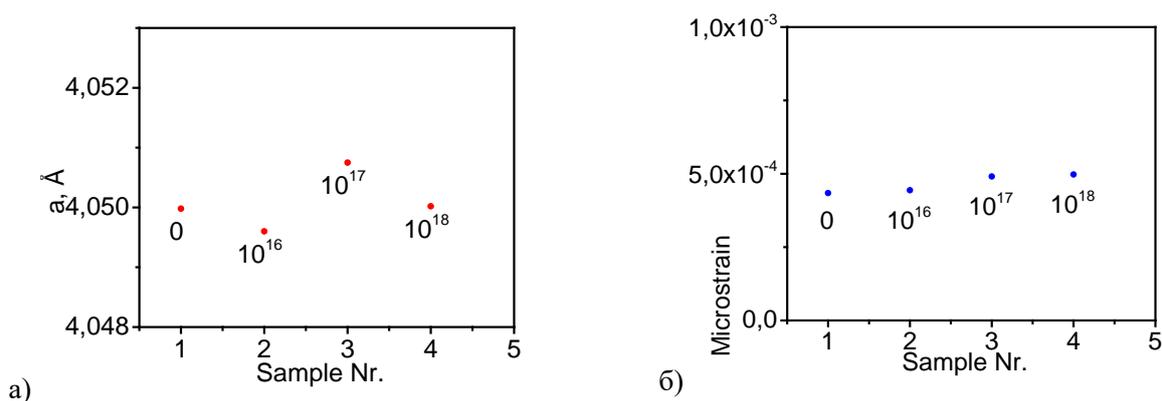


Рис. 8. Параметры кристаллической решетки (а) и средняя микродеформация (б) для образцов алюминиевого сплава САВ-1. Для облученных образцов указаны полученные дозы

С увеличением дозы облучения межплоскостное расстояние уменьшается. В угле около $2\theta_B \sim 124^\circ$ межплоскостное расстояние и параметр решетки уменьшаются на 1,2% при облучении дозой 10^{18} н/см². Причина

уменьшения межплоскостного расстояния - образование дефектов (пар Френкеля) при облучении, возникновение кластеров и расположение этих кластеров между плоскостью ГЦК.

Параметры структуры, полученные нами рентгеноструктурным фазовым анализом (РСФА), хорошо согласуются с расчётными данными программы Full Prof. Так как РСФА определяет изменение на поверхности материала, то этим методом удаётся определить изменение параметров решетки, которые практически не наблюдаются при нейтронно-структурном анализе (ФСД) из-за объёмного характера измеряемых величин.

В итоге, с увеличением дозы облучения возрастают прочностные характеристики сплава алюминия САВ-1.

В четвертой главе «Исследование микротвердости и прочности алюминиевых сплавов САВ-1 и АМГ-2» приведены результаты исследования зависимости микротвердостей сплавов САВ-1 и АМГ-2 до и после нейтронного облучения от температуры и дозы облучения.

Результаты измерений микротвердости для образцов сплава САВ-1 представлены на рисунке 9 (а, б). Видно, что зависимость H_{μ} (P) можно условно разделить на два интервала: при нагрузках от 0 до 50 г наблюдается резкая зависимость H_{μ} от нагрузки; с увеличением нагрузки кривые $H_{\mu}(P)$ становятся более пологими и выходят на насыщение.

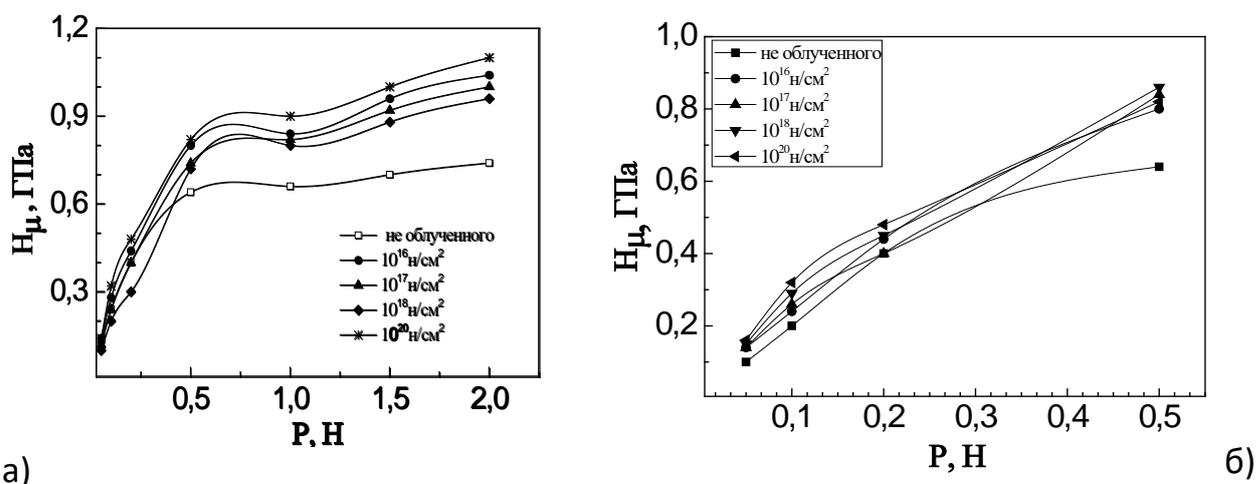


Рис. 9 (а, б). Зависимость микротвердости образцов сплава САВ-1 от нагрузки: (1) 10^{16} н/см², (2) 10^{17} н/см², (3) 10^{18} н/см², (4) 10^{20} н/см²

Вследствие наличия трещин и пониженной прочности поверхностного слоя, а также из-за возможности поверхностного наклепа, изменение применяемой нагрузки приводит к проникновению алмазной пирамиды в различные по своим физическим и химическим свойствам слои. Полученные в эксперименте значения H_{μ} отражают особенности свойств этих слоев. На рисунке 9б представлена зависимость H_{μ} (P) при нагрузках менее 50 г. Можно отметить, что величина микротвердости особенно сильно возрастает с увеличением P для образцов, облученных флюенсами 10^{16} , 10^{17} и 10^{20} н/см².

На рисунке 10 приведены зависимости H_{μ} образцов сплава САВ-1 от флюенса нейтронов при фиксированной нагрузке. Видно, что для сплава САВ-1 до $\Phi=10^{18}$ н/см² наблюдается снижение микротвердости, пропорциональное логарифму флюенса, затем, с дальнейшим набором флюенса, H_{μ} увеличивается. На рисунке 11 приведены зависимости микротвердости облученных образцов сплава АМГ-2 от флюенса нейтронов.

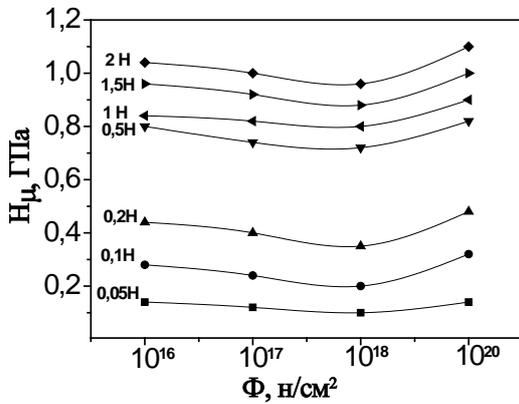


Рис. 10. Зависимость микротвердости облученных образцов сплава САВ-1 от флюенса нейтронов

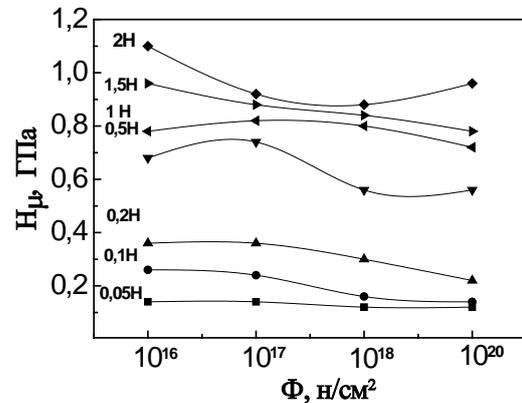
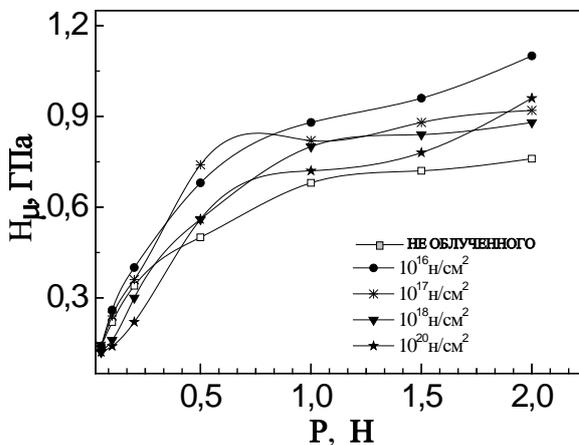
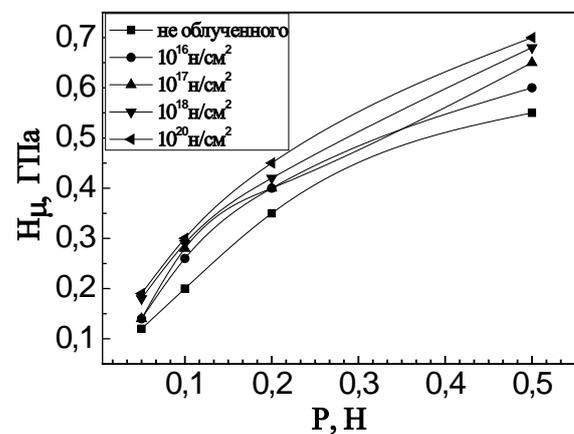


Рис. 11. Зависимость микротвердости облученных образцов сплава АМГ-2 от флюенса нейтронов

Значения микротвердости облученных различными флюенсами образцов сплавов САВ-1 и АМГ-2 в зависимости от нагрузки представлены на рис. 12 (а, б).



а



б

Рис. 12 (а, б). Зависимость микротвердости образцов сплава АМГ-2 от нагрузки: (1) 10^{16} н/см², (2) 10^{17} н/см², (3) 10^{18} н/см², (4) 10^{20} н/см²

Как видно, для сплава АМГ-2, H_{μ} увеличивается с возрастанием нагрузки, переходя к очень слабому насыщению при $P>100$ г. Следует отметить, что до $P=0,5$ Н микротвердость увеличивается приблизительно пропорционально нагрузке, т.е. зависимости $H_{\mu}(P)$ описываются почти линейной функцией (рис. 12 б).

В отличие от образцов сплава САВ-1, микротвердость АМГ-2 непрерывно уменьшается с набором флюенса, показывая линейную зависимость от логарифма потока нейтронов. Анализируя поведение микротвердости, можно предложить, что облучение приводит к деградации микротвердости АМГ-2.

Нами обнаружена зависимость изменения микротвёрдости от флюенса нейтронов и определена следующая эмпирическая формула:

$$H_{\mu} = -0,11 + 0,02 \cdot \ln F \quad (3)$$

Эта формула позволяет определить значения микротвердости H_{μ} в труднодоступных местах конструкционных материалов реакторов не разрушая целостность конструкции с достаточной точностью. Для этого достаточно определить расчетным путем флюенс нейтронов в данной точке конструкционных материалов.

При больших дозах нейтронного облучения образцов их экспериментальные значения микротвердости H_{μ} хорошо согласуются с расчетными.

На рисунке 13 приведены экспериментальные и расчетные данные микротвердости H_{μ} сплава САВ-1 в зависимости от флюенса нейтронов (F).

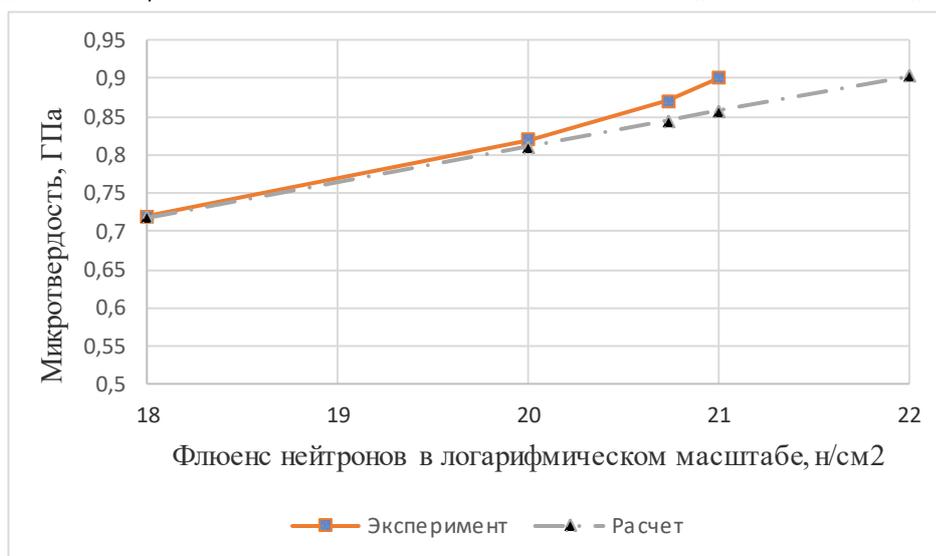


Рис. 13. Экспериментальные и расчетные данные микротвердости H_{μ} сплава САВ-1 в зависимости от флюенса нейтронов (F)

Существенное уменьшение размеров (раздробление) и рассеяние локальных нерастворимых интерметаллических фаз по большому объему сплавов после реакторного облучения и радиационные дефекты, по-видимому, приводят к дополнительному закреплению дислокаций, что обуславливает увеличение микротвердости образцов.

Обнаружена зависимость предела текучести САВ-1 от флюенса нейтронов, а также определена эмпирическая формула для расчета предела текучести образцов в зависимости от флюенсов нейтронов в диапазоне от 10^{16} до $3,5 \cdot 10^{22}$ н/см².

$$\sigma_{0.2} = 49,8097 \cdot F^{0,0322} \quad (4)$$

Таблица 3

Экспериментальные и расчетные данные предела текучести ($\sigma_{0.2}$) сплава САВ-1 в зависимости от флюенса нейтронов (F)

Флюенс, F, н/см ²	Эксперимент, $\sigma_{0.2}$, МПа	Расчет, $\sigma_{0.2}$, МПа
1,00E+16	180 (Настоящая работа)	151,47
1,00E+17	159 (Настоящая работа)	163,12
1,00E+18	162 (Настоящая работа)	175,68
1,00E+19		189,20
1,00E+20		203,76
1,00E+21	240	219,44
1,00E+22	255	236,33

Из таблицы 3 видно изменение предела текучести $\sigma_{0.2}$ алюминиевого сплава САВ-1 от флюенса: при дозе 10^{16} н/см² можно увидеть резкое увеличение предела текучести $\sigma_{0.2}$, при дозе 10^{17} н/см² предел текучести $\sigma_{0.2}$ уменьшается за счет радиационного отжига и зоны Гинье-Престона.

В таблице 3 и 4 приведены литературные и наши экспериментальные данные предела текучести $\sigma_{0.2}$, предела прочности (временное сопротивление) σ_b , предела текучести (физический) σ_T , предела пропорциональности $\sigma_{пл}$, предела упругости $\sigma_{уп}$, истинного сопротивления разрыву S_k , относительного удлинения δ и сужения ψ для необлученного и облученного флюенсами 10^{16} н/см², 10^{17} н/см², 10^{18} н/см² сплава САВ-1 и расчётные данные с помощью эмпирической формулы для предела текучести $\sigma_{0.2}$ для флюенсов 10^{19} н/см², 10^{20} н/см², 10^{21} н/см² и 10^{22} н/см². Наши результаты для необлученных образцов совпадают с 3-мя литературными данными.

Рассмотрим показанную на рис. 14 диаграмму, на которой по вертикальной оси отложена приложенная сила F в килоньютонах, а по горизонтальной оси - абсолютное удлинение ΔL образца. Такие диаграммы строят по результатам растяжения образцов на специальных испытательных разрывных машинах. Полученная кривая позволяет судить о прочности образца на растяжение.

Таблица 4

Основные характеристики механических свойств при растяжении образцов САВ-1 до и после облучения в реакторе ИБР-2 при разных флюенсах быстрых нейтронов

Флюенс, н/см ²	σ_b , МПа	σ_T , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	$\sigma_{пл}$, МПа	$\sigma_{уп}$, МПа	S_k , МПа	δ , %	ψ , %	Литература
0	160	154,	154,	108,	117,	147,	18	1	Таджибаев Д.П. и др.
0							16,		Карасев В.С. и др.
0			162				16.		Лебедев В.М.
0	214		156,						Нajewska E. Poland, 1993
0	225		155				18		Диденко В.И., Коноплев
10^{16}	190	185	180	83.4	110	119	16	1	Таджибаев Д.П. и др.
10^{17}	165	159	159	83.4	100	107	17	1	Nuclear physics and atomic energy. – Kiev (Ukraine), 2022
10^{18}	175	162	162	84	105	110	13, 5	7	
$0.5 \cdot 10^{21}$	290		210				16		Диденко В.И., Коноплев
$0.83 \cdot 10^{21}$	310		240				11		К.А., Полтавский А.С., Якорев О.П.,
$1.37 \cdot 10^{21}$	350		295				7.3		Материаловедческие
$2.43 \cdot 10^{21}$	340		315				2.5		Нajewska E. Poland, 1993.
$1,9 \cdot 10^{22}$	277		255						
$2.16 \cdot 10^{22}$			275.				7.3		Лебедев В.М. и др.
$2.78 \cdot 10^{22}$			261.				6.7		Исследование нано-структуры сплава САВ-1, обл. б.нейтронами... – С.Петербург, 2014
$3.13 \cdot 10^{22}$			282. 9				5.8		
$3.48 \cdot 10^{22}$			275. 8				5.1		Диденко В.И., Коноплев К.А. и др.
$3,5 \cdot 10^{22}$							2,5		Карасев В.С. и др. Москва, 1989.

Нами обнаружена зависимость предела текучести от величины микротвердости в диапазоне флюенса быстрых нейтронов от 10^{16} н/см² до 10^{23} н/см².

$$\sigma_{0.2} = -3515.77H_{\mu}^3 + 9461.31H_{\mu}^2 - 8044.081H_{\mu} + 2358.82 \quad (5)$$

В таблице 5 приведены результаты расчетов предела текучести в зависимости от микротвердости по вышеуказанной формуле до флюенса 10^{23} н/см².

Полученные расчеты согласуются с экспериментальными данными: при малых дозах (10^{16} - 10^{19} н/см²) разница между данными в пределах 2%, при больших дозах (10^{20} - 10^{23} н/см²) - до 5%. Из этих данных можно сказать, что формула (5) для определения предела текучести $\sigma_{0.2}$ исходя из значений микротвердости H_{μ} создана очень удачно.

Ожидаемый флюенс на конец 2040 года в конструкционных материалах наиболее активной зоны реактора ВВР-СМ не превысит $1.87 \cdot 10^{22}$ н/см².

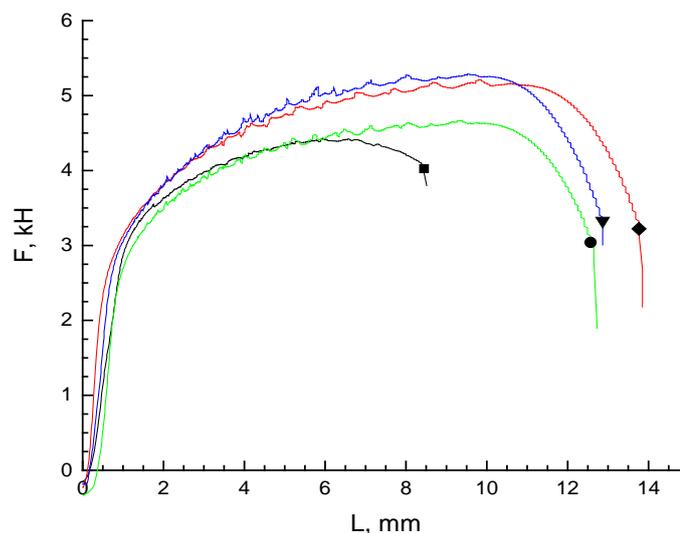


Рис. 14. Диаграмма растяжения: F - нагрузка растяжения, вызывающая удлинение образца на площадке текучести (кН), L - длина образца в момент разрыва. Образцы: \blacksquare - необлученный; \blacklozenge - 10^{16} н/см²; \bullet - 10^{17} н/см²; \blacktriangledown - 10^{18} н/см²

Таблица 5

Результаты расчетов предела текучести в зависимости от микротвердости до флюенса 10^{23} н/см²

Флюенс, н/см ²	Эксперимент, H_{μ} , ГПа	Эксперимент, $\sigma_{0.2}$, МПа	Расчеты $\sigma_{0.2}$ через H_{μ} , МПа
1,00E+16	0,8	180 (Настоящая работа)	178,72
1,00E+17	0,74	159 (Настоящая работа)	162,54
1,00E+18	0,72	162 (Настоящая работа)	159,57
1,00E+19	0,88		210,97
1,00E+20	0,9		219,81
1,00E+21	0,95	240	228,63
1,00E+22	1,2	255	241,44
1,00E+23			249,46

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов исследования, проведенного по теме диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам «Влияние нейтронного облучения на структуру и прочностные характеристики конструкционных материалов САВ-1 и АМГ-2 ядерного реактора», сделаны следующие выводы:

1. Определено уменьшение интенсивности отражения пика второй фазы Mg_2Si на 16% в рентгенограмме образцов САВ-1 при флюенсе нейтронов 10^{18} н/см².
2. Впервые обнаружено, что с увеличением дозы облучения межплоскостное расстояние в угле около $2\theta \sim 124^\circ$ уменьшается от 1,0132

Å до 1,0011 Å при облучении флюенсом 10^{18} н/см², угол отражения (2θ) увеличивается за счет перемещения ионов кремния в междоузельном пространстве САВ-1.

3. Рентгеноструктурным фазовым анализом (РСФА) определены параметры структуры, которые хорошо согласуются с расчётными данными по программе FullProf. Так как РСФА определяет изменение на поверхности материала, то этим методом удаётся определить изменение параметров решетки, которые практически не наблюдаются при нейтронно-структурном анализе (ФСД) из-за объёмного характера измеряемых величин.
4. Выявлено, что нейтронное облучение при флюенсе нейтронов 10^{20} н/см² приводит к изменению параметров кристаллической решетки образцов в результате увеличения микротвердости для образцов САВ-1 на 33% и АМГ-2 на 10%.
5. Проведено сравнение экспериментальных данных предела текучести $\sigma_{0,2}$, предела прочности (временное сопротивление) σ_B , предела текучести (физический) σ_T , предела пропорциональности $\sigma_{пц}$, предела упругости $\sigma_{уп}$, истинного сопротивления разрыву S_K , относительного удлинения δ и сужения ψ для необлучённого и облученного флюенсами 10^{16} , 10^{17} , 10^{18} н/см² сплава САВ-1 с расчётными данными с помощью эмпирической формулы для предела текучести $\sigma_{0,2}$ при флюенсах 10^{19} , 10^{20} , 10^{21} и 10^{22} н/см². Результаты для необлученных образцов совпадают с литературными данными.
6. Получена эмпирическая формула для расчета предела текучести и микротвердости образцов в зависимости от флюенса нейтронов, а также взаимосвязь микротвердости и предела текучести для образцов САВ-1 в диапазоне от 10^{16} до $3,5 \cdot 10^{22}$ н/см².

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

INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS

TADJIBAEV DIYER PULATOVICH

**INFLUENCE OF NEUTRON IRRADIATION ON THE STRUCTURE AND
STRENGTH CHARACTERISTICS OF STRUCTURAL MATERIALS OF
THE SAV-1 AND AMG-2 OF THE NUCLEAR REACTOR**

01.04.07 – Condensed matter physics

**DISSERTATION ABSTRACT
of the Doctor of Philosophy (PhD) in physical and mathematical sciences**

Tashkent – 2023

The topic of the dissertation of the Doctor of Philosophy (PhD) in physical and mathematical sciences is registered with the Higher Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number No. B2023.4.PhD/FM184

The doctoral (PhD) dissertation is 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 and on the website of “Ziyonet” Information and Educational portal at www.ziyonet.uz.

Scientific supervisor:

Baitesov Sapar Akimovich

Doctor of Technical Sciences, leading staff scientist

Official opponents:

Axmedjanov Farxod Rashidovich

Doctor of sciences in physics and mathematics, docent

Mussaeva Malika Anvarovna

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
leading staff scientist

Leading organization:

**Institute of Nuclear Physics of the Ministry of Energy
of the Republic of Kazakhstan**

The defense of the dissertation will take place “__” _____ 2023 at ____ hours at a meeting of the Scientific Council DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics, Astronomical Institute, National University of Uzbekistan (Address: 100214, Tashkent, Ulugbek settlement, INP; tel.: (+998) 71-289-31-18; fax: (+998) 71-289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

The dissertation is registered at the Information Resource Center of the Institute of Nuclear Physics (registration number ____), the dissertation can be found at the IRC (Address: 100214, Tashkent, Ulugbek village, INP. Tel. (+998) 71-289-31-19)

The abstract of dissertation was distributed on “__” _____ 2023.
(Registry record No. ____ dated “__” _____ 2023.)

M.Yu. Tashmetov

Chairman of the Scientific Council
on award of Scientific degrees, D.Ph-M.S., Professor

O.R. Tojiboev

Scientific secretary of the Scientific Council
on award of Scientific degrees,
PhD ph.-m.s., Senior Researcher

E.M. Tursunov

Chairman of the Scientific seminar
of the Scientific Council on award of
Scientific Degrees, D.Ph-M.S., Professor

INTRODUCTION (PhD thesis annotation)

The aim of the research is to identify the impact of neutron irradiation on the structures and strength properties of structural materials of the SAV-1 and AMG-2 alloys.

The tasks of the research are to:

analyze neutron influence on surface and volume structure of SAV-1 alloy;
measure the microhardness of SAV-1 and AMG-2 aluminum alloy samples before and after neutron fluence irradiation from 10^{16} to 10^{20} n/cm², under different loads on the indenter;

determine the contribution of neutron irradiation to a number of strength characteristics of structural materials of nuclear reactors from SAV-1 alloy;

analyze and identify the patterns of change in the microhardness and strength of aluminum alloys depending on fast neutrons fluence;

determine an empirical formula linking microhardness to the yield limit of SAV-1 samples in the range of 10^{16} to $3.5 \cdot 10^{22}$ n/cm².

The object of the research is samples of structural materials of aluminum alloys AMG-2 and SAV-1, which differ in the percentage of impurities.

The subject of the research is the study of the structures and strength of aluminum alloys AMG-2 and SAV-1 depending on fast neutron fluences.

Research methods. To determine microhardness, it was used a standard device (PMT-3); the strength values of the alloy were determined by a loading machine (LM-20). To study the structure, experiments were carried out on neutron diffraction on a Fourier stress diffractometer and on X-ray diffraction on a multifunctional X-ray diffractometer EMPYREAN.

Scientific novelty of the research is presented in the following:

for the first time, a 16% decrease in the reflection intensity of the peak of the second phase of Mg₂Si in the X-ray diffraction patterns of SAV-1 samples was determined a neutron fluence of 10^{18} n/cm²;

it is shown that with an increase in the irradiation dose to 10^{18} n/cm² at an angle of about $2\theta \sim 124^\circ$, the interplanar distance decreases from 1.0132 Å to 1.0011 Å, while the reflection angle (2θ) increases due to the movement of silicon ions in the interstitial space of the SAV- 1;

it is shown that neutron irradiation at a neutron fluence of 10^{20} n/cm² leads to a change in the crystal lattice parameters of the samples as a result of an increase in microhardness for samples SAV-1 by 33% and AMG-2 by 10%;

an empirical formula was obtained for calculating the yield strength and microhardness of samples depending on the neutron fluence, and determined the relationship between microhardness and the yield strength of SAV-1 samples in the range from 10^{16} to $3.5 \cdot 10^{22}$ n/cm².

Implementation of research results. On the basis of the results obtained from the study of the influence of neutron irradiation on the structural and strength properties of the structural materials of the nuclear reactor:

shown in the X-ray diffraction peak of the second phase of Mg_2Si in which the intensity decreases by 16% at a neutron fluence of 10^{18} n/cm² in SAV-1 samples and the discovered effect, which shows that as the irradiation dose increases, the interplanar distance in the angle of about $2\theta \sim 124^\circ$ decreases from 1.0132 Å to 1.0011 Å when irradiated with a fluence of 10^{18} n/cm² in SAV-1 samples were used at the VVR-K nuclear research reactor (letter from the Institute of Nuclear Physics of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan No. 34-15.08-12/1359 dated November 16, 2023). The use of the results made it possible to determine the structural and strength properties of SAV-1 alloys in the structural materials of the VVR-K reactor;

revealed patterns of changes in the structure of samples depending on the dose of neutron irradiation, leading to an increase in the density and microhardness of samples SAV-1 by 33% and AMG-2 by 10% at a neutron fluence of 10^{20} n/cm², were used at the WWR-SM research nuclear reactor (Letter from the Academy of Sciences Republic of Uzbekistan No. 2/1255-2519 dated 28 November 2023). The use of the results made it possible to estimate the safety factor of structural materials for the timely determination of the time period for replacing structural materials at the VVR-SM reactor.

Dissertation volume and structure. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, and a list of references. The volume of the dissertation is 102 pages.

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I bo'lim (I часть; part I)

1. Abdukadyrova I.Kh., Tadzhibaev D.P. Investigation of the mechanical properties of SAV-1 structural aluminum alloy // Atomic Energy. – Springer, 2009. – Vol. 107. No. 2. – P.144-147 (№3. Scopus; IF=0.384).
2. Салихбаев У.С., Байтелесов С.А., Абдукадырова И.Х., Халиков У.А., Таджибаев Д.П. Влияние реакторного излучения на микротвердость авиалей // Вестник Национального университета Узбекистана. – Ташкент, 2009. – № 2. – С.53-56 (01.00.00. №8)
3. Абдукадырова И.Х., Таджибаев Д.П. Поверхностные эффекты в реакторно-облученных конструкционных материалах // Известия высших учебных заведений. Физика. – Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет (Россия), 2011. – № 1/2. – С. 4-6 (№3. Scopus; IF=0.671)
4. Abdukadyrova I.Kh., Tadzhibaev D.P. Effect of nuclear radiation on the microhardness of SAV-1 avials // Strength of Materials. – Springer, 2011. – Vol. 43. No. 1. – pp. 109-112 (№3. Scopus; IF=0,644)
5. Baitelesov S.A., Kungurov F.R., Tadzhibaev D.P., Rakhimov E.T., Alikulov Sh.A. Effect of Reactor Irradiation on the Microhardness of SAV-1 and AMG-2 Structural Materials // Journal of Surface Investigation. Xray, Synchrotron and Neutron Techniques. – Springer Nature, 2013. – Vol. 7. No. 4. – pp. 753–755 (№11. Springer; IF=0,4).
6. Alikulov Sh.A., Baytelesov S.A., Kungurov F.R., Tadzhibaev D.P., Tojiboev D.D. Effect of neutron irradiation on the structure and strength of the SAV-1 aluminum alloy // Nuclear physics and atomic energy. – Kiev (Ukraine), 2022. - Vol.23. No. 1. – pp. 33-38 (№3. Scopus; IF=0,896)

II bo'lim (II часть; part II)

7. Аликулов Ш.А., Байтелесов С.А., Кунгуров Ф.Р., Таджибаев Д.П., Тожибоев Д.Д. Изменение прочности алюминиевых сплавов САВ-1 и АМГ-2, облученных нейтронами // Вестник НЯЦ РК. – Казахстан, 2023. – № 3. – С. 25-32.
8. Абдукадырова И.Х., Таджибаев Д.П. Влияние реакторного излучения на микротвердость авиалей // II Республиканская конференция «Молодых физиков Узбекистана» 25-26 ноября 2008: Сборник докладов. – Ташкент: ИЯФ АН РУз, 2008. – С. 185-190.
9. Абдукадырова И.Х., Салихбаев У.С., Таджибаев Д.П. Поверхностные эффекты в некоторых реакторно-обработанных конструкционных

- материалах // «Ядерная и радиационная физика»: Тез. докладов 7 межд. конф. 8-11 сентября 2009. – Алматы, 2009. – С. 177.
10. Abdukadirova I. Kh., Baytelesov S.A., Tadjibaev D.P. Dependence of microhardness of SAV-1 TYPE alloys on loading and irradiation dose // “Modern Problems of Nuclear Physics”: The Seventh International Conference, September 22-25, 2009. – Tashkent: INP, 2009. – pp.132-133.
 11. Байтелесов С. А., Кунгуров Ф. Р., Рахимов Э. Т., Таджибаев Д. П., Аликулов Ш.А. Влияние реакторного излучения на микротвердость конструкционных материалов реактора САВ-1 и АМГ-2 // «Замонавий физиканинг долзарб муаммолари»: Республика ёш олимлар ва иқтидорли талабалар мактаб-семинари материаллари, 28-29 май 2010. Самарканд, 2010. – С. 83-88.
 12. Абдукадырова И.Х., Таджибаев Д.П. Поверхностные эффекты реакторно-облученных конструкционных материалах // «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах»: Труды VII Межд. научн. конф. 2-10 октября 2010. – Томск, 2010. – С. 331-335.
 13. Абдукадырова И.Х., Таджибаев Д.П. Влияние различных факторов на механические свойства конструкционных алюминиевых сплавов // «Фундаментальные и прикладные вопросы физики»: Международная конференция, посвященная 80-летию академика М.С. Саидова, 24-25 ноября 2010. – Ташкент: «Физика-Солнце», 2010. – С. 315-316.
 14. Таджибаев Д.П. Влияние реакторного излучения на микротвердость конструкционных материалов реактора САВ-1 и АМГ-2 // «Синхротронные и нейтронные исследования наносистем»: Постерный доклад на 5 международной конференции 23 июня 2012. – Дубна, 2012.
 15. Tadjibaev D.P., Baytelesov S.A., Kungurov F.R. Influence of irradiation by neutrons on forma changes of aluminum alloys // “Nuclear Science and its Application”: International Conference, Samarkand, September 25-28, 2012. Book of Abstracts. – Tashkent: INP, 2012. – pp. 312-313.
 16. Baytelesov S.A., Tadjibaev D.P., Bokuchava G.D., Bulavin M.V., Papushkin I.V. Change in the Structure and Strength of Aluminum Alloys SAV-1 Irradiated with Fast Neutrons // “Modern Problems of Nuclear Physics and Nuclear Technologies”: The Ninth International Conference, September 24-27, 2019. Book of Abstracts. – Tashkent: INP, 2019. – pp. 129-131.
 17. Baytelesov S.A., Tadjibaev D.P., Turdieva G.N., Turaeva D.M. Research of Strength Change in Aluminum Alloy SAV-1 During Irradiation at Low Fluxes at IBR-2 Reactor // “Modern problems of nuclear energetics and nuclear technologies”: International Conference, November 23-25, 2021. Book of Abstracts. – Tashkent: INP, 2021. – pp. 102-103.
 18. Байтелесов С.А., Таджибаев Д.П., Кунгуров Ф.Р., Аликулов Ш.А. Тожибоев Д.Д. Изменение структуру и прочности алюминиевых сплавов САВ-1 облученное быстрыми нейтронами // IV International

scientific forum “Nuclear Science and Technologies” September 26-30, 2022. Abstracts. – Almaty (Republic of Kazakhstan), 2022. – C. 119-120.