

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

---

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ**

**РАХМАНОВ САЙФИДДИН ЖЎРАБОЕВИЧ**

**ТИТАН КАРБИДИ АСОСИДАГИ ИККИ ПОДРЕШЕТКАЛИ МЕТАЛЛ  
ВА НОМЕТАЛЛ БИРИКМАЛАРИНИНГ КРИСТАЛЛ СТРУКТУРАСИ  
ВА ФАЗА ЎТИШЛАРИ**

**01.04.07 – Конденсирланган ҳолат физикаси**

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

**Тошкент – 2022**

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

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

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

**Рахманов Сайфиддин Жўрабоевич**

Титан карбиди асосидаги икки подрешеткали металл ва нометалл бирикмаларининг кристалл структураси ва фаза ўтишлари..... 3

**Рахманов Сайфиддин Джурабоевич**

Кристаллическая структура и фазовые превращения сплавов с двойными подрешетками металлов и неметаллов на основе карбида титана..... 23

**Rakhmanov Sayfiddin Dzhuraboevich**

Crystal structure and phase transformations of alloys with double sublattices of metals and nonmetals based on titanium carbide..... 43

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works..... 48

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

---

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ**

**РАХМАНОВ САЙФИДДИН ЖЎРАБОЕВИЧ**

**ТИТАН КАРБИДИ АСОСИДАГИ ИККИ ПОДРЕШЕТКАЛИ МЕТАЛЛ  
ВА НОМЕТАЛЛ БИРИКМАЛАРИНИНГ КРИСТАЛЛ СТРУКТУРАСИ  
ВА ФАЗА ЎТИШЛАРИ**

**01.04.07 – Конденсирланган ҳолат физикаси**

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

**Тошкент – 2022**

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2021.4.PhD/FM249 рақами билан рўйхатга олинган.**

Докторлик диссертацияси Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Ядро физикаси институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида ([www.inp.uz](http://www.inp.uz)) ва “Ziyonet” Ахборот-таълим порталида ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)) жойлаштирилган.

**Илмий раҳбар:**

**Хидиров Ирисали**

физика-математика фанлари доктори, профессор

**Расмий оппонентлар:**

**Джуманов Сафарали**

физика-математика фанлари доктори, профессор

**Пайзуллаханов Мухаммаде-Султанхан**

**Саидвалиханович**

техника фанлари доктори, катта илмий ходим

**Етакчи ташкилот:**

**Ислом Каримов номидаги Тошкент давлат техника университети**

Диссертация ҳимояси Ядро физикаси институти ҳузуридаги DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 рақамли Илмий кенгашининг 2022 йил \_\_\_\_\_ соат \_\_\_\_\_ даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 100214, Тошкент шаҳри, Улуғбек кўрғони, Ядро физикаси институти. Тел.: (+998) 71-289-31-41; факс: (+99871) 289-36-65; e-mail: [info@inp.uz](mailto:info@inp.uz)).

Диссертация билан Ядро физикаси институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (\_\_\_\_\_ рақами билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100214, Тошкент шаҳри, Улуғбек кўрғони, Ядро физикаси институти. Тел. (+99871) 289-31-19).

Диссертация автореферати 2022 йил “\_\_\_” \_\_\_\_\_ куни тарқатилди.  
(2022 йил “\_\_\_” \_\_\_\_\_ даги \_\_\_\_\_ рақамли реестр баённомаси)

**М.Ю. Ташметов**

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

**О.Р. Тожибоев**

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

**Э.М. Турсунов**

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

## КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти.** Бугунги кунда ўзгарувчан таркибли томонлари марказлашган куб (ТМК) структурали  $TiC_x$  титан карбидини ( $x = 0.33 - 1.00$ ) тадқиқ қилишга катта эътибор қаратилмоқда. Бундай катта қизиқиш унинг қийин эрувчанлиги (3270 К дан юқори), иссиқликка чидамлилиги, юқори мустаҳкамликка эгаллиги, коррозия ва радиацияга чидамлилиги каби хоссаларининг мавжудлигидир. Бундан ташқари у ўзига хос электр ва магнит хоссаларига эга. Энг муҳими шундаки, кенг гомоген-лик соҳаси туфайли унинг қимматли хоссаларини кенг оралиқда ўзгартириш мумкин. ТМК  $TiC_x$  титан карбидининг қўлланиш соҳаси жуда ҳам кенгдир. У экстремал шароитларда саноатда ва техникада, кемасозликда, ракетасозликда, инструментал техникада ва тиббиётда кенг қўлланилади. Лекин катта стратегик аҳамиятга эга бўлган бундай материал водород киришмасига жуда ҳам сезгир бўлади. Ҳаттоки, кичик миқдордаги водород киришмаси ҳам титан карбидининг кристалл тузилишини ўзгартириши ва шунга мос равишда хусусиятларига зарарли таъсир кўрсатиши мумкин. Водород атоми кичик радиусга эга бўлгани туфайли, унинг кўп миқдордаги атомларини ТМК  $TiC_x$  титан карбидининг қўплаб октаэдр ва тетраэдр тугунлари оралиқларида жойлаштириш мумкин бўлгани учун ундан водород энергетикасида ҳамда водород материалшунослигида водород резервуари манбаи сифатида фойдаланиш мумкин.

Бундан ташқари илмий адабиётлар таҳлилидан маълум бўлдики, ТМК титан карбидида титан атомларининг сезиларли қисмини молибден атомлари билан алмаштириш натижасида хусусиятлари жиҳатидан заҳиралари жуда ҳам танқис бўлган вольфрам бирикмаларидан кам бўлмаган бирикма ҳосил бўлади. Агар ТМК титан карбидида водород икки подрешеткали нометалл суқилма бирикмасини ҳосил қилса, молибден қийин эрувчи икки подрешеткали металл суқилма бирикмасини ҳосил қилади. Юқорида санаб ўтилган ноёб хусусиятлар туфайли, титан карбид асосидаги икки подрешеткали нометалл ва икки подрешеткали металл карбидини ўрганиш, водород материалшунослиги ва қийин эрувчи бирикмалар материалшунослигининг долзарб масаласи ҳисобланади.

Мамлакатимизда қаттиқ жисм ва материалшунослик соҳасидаги тажрибавий ҳамда назарий ишларни жаҳон миқёсида ривожлантиришга катта эътибор қаратилмоқда. Шу нуқтаи назардан олинган натижалар асосида, хусусан, ишлов бериш хоссаларининг юқори кўрсаткичларига эга бўлган наноструктурали  $TiC_x$  титан карбидини олиш имкониятлари кўрсатилди. Бу йўналишда материалшунослик соҳасидаги назарий ва амалий тадқиқотларнинг инновацион технологияларини қўллаш орқали ушбу йўналишдаги тадқиқотлар самарадорлигини ошириш муҳим аҳамият касб этади. У 2022-2026 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида<sup>1</sup> акс эттирилган.

<sup>1</sup> 2022 йил 28 январдаги ПФ-60-сонли “2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январдаги ПФ-60сонли “2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегияси тўғрисида”ги фармони, 2017 йил 13 февралдаги ПҚ-2772-сонли “2017-2021 йиллар электрон саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида”, 2017 йил 26 майдаги ПҚ-3012-сонли “2017-2021 йилларда қайта тикланувчи энергетикани янада ривожлантириш, иқтисодиёт ва ижтимоий соҳада энергия самарадорлигини ошириш чора-тадбирлари дастури тўғрисида” ва 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сонли “Фанлар академияси фаолиятини янада такомиллаштириш, илмий ишларни ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштириш бўйича чора-тадбирлар тўғрисида”ги қарорлари ҳамда ушбу соҳадаги бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

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

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.**  $TiC_x$  титан карбидининг кристалл тузилишини ўз ичига олган физик, механик хусусиятларини ўрганиш, дунёнинг етакчи олимлари, шу жумладан, россиялик (А.И.Гусев, А.А.Ремпель, В.Н.Липатников, С.З.Назарова, Л.В.Зуева, Р.А.Андриевский, И.И.Спивак), корейлик (С.Н. Lee, Н.С. Shim, Y.N. Choi, J.S. Lee, М.Р. Hwang) олимлар ва бошқалар томонидан тадқиқ қилинган. Улар томонидан IV-VI гуруҳлардаги оралик металлларнинг карбидларида ва нитридларида фаза ўтишлари бўйича назарий ҳамда тажрибавий тадқиқотлар ўтказилган, электр, иссиқлик, физик ва механик хоссалари ўрганилган.

Бир қатор Ўзбекистон олимлари (И.А.Каримов, В.Т.Эм, И.Хидиров, М.Каланов, А.Эмиралиев, Ф.Файзуллаев, И.С.Латергаус, М.Ю.Ташметов, Б.Б.Мирзаев, А.С.Парпиев) томонидан ЎзР ФА ЯФИ ВВР-СМ ядро реакторининг горизонтал каналларида созланган DN-500 нейтрондифрактометрида бундай бирикмаларнинг кристалл тузилишлари ва фаза ўтишларининг нейтронографиявий тадқиқотлари ўтказилган. Ушбу тадқиқотларнинг натижалари илмий жамоатчилик томонидан эътироф этилган. Улар томонидан илк марта IV-VI гуруҳлардаги оралик металлларнинг карбидларида ва нитридларида фаза шаклланишлари ҳамда кристалл структураларига водороднинг таъсири кўрсатиб берилган, ушбу натижалар кристаллография бўйича Халқаро маълумотлар базасига киритилган.

Сўнги вақтларда россиялик олимлар П.В.Бурков ва С.Н.Кульковлар томонидан титан атомларининг сезиларли қисми (10 ат. %гача) молибден атомлари билан ўрин алмашинуви натижасида стехиометрик  $TiC_x$  титан карбиди ишчи тавсифларининг сезиларли даражада яхшиланиши кўрсатилди.

Бунда механик хусусиятлари, танқис ва қимматбаҳо вольфрамни ўз ичига олган бирикмаларнинг хусусиятларидан юқори бўлган иккита подрешеткали металл карбиди ҳосил бўлади. Ўзбек олимлари М.Ю.Ташметов ва М.Патиев томонидан ностехиометрик титан ҳамда ваннадий карбидлари асосида кўп таркибли суқилма бирикмаларида фаза ўтишлар ўрганилиб, фаза шаклланишида иккита металл (Mo, V, Ta, Nb) ва иккита нометалл (O, N ва H)ларнинг аҳамияти ва бундай бирикмаларда ҳарорат таъсирида нометалл атомларининг тартибланиши кўрсатиб берилган.

Лекин титан карбидининг техника, саноат ва тиббиётда катта амалий аҳамиятига қарамадан, кенг оралиқда турли хил миқдордаги водородни унинг карбиди структурасининг барқарорлигига таъсирини ўрганиш тизимли равишда олиб борилмаган. Ваҳоланки, титан карбидини олишнинг ўзига хос технологик хусусиятлари туфайли у кўпинча нометалл подрешеткада турли хил миқдордаги водород киришмаларини ўз ичига олиши мумкин. Бундан ташқари, ушбу масала мустақил қизиқиш уйғотади. Чунки таркибида водород бўлган титан карбиди юқори ҳароратли водород резервуари сифатида водород энергетикасида фойдаланиш учун номзодлардан биридир. Шунингдек,  $TiC_x$  титан карбидининг бирикмасида титан атомларининг кўп қисмини 10 ат. %дан кўп молибден атомлари билан алмаштирилган бирикма ҳали синтез қилинмаган ва механик хоссаларига таъсири ўрганилмаган.

**Диссертация тадқиқотининг диссертация иши бажарилган илмий - тадқиқот муассасасининг илмий тадқиқот ишлари режаларига боғлиқлиги.** Диссертация иши ЎзР ФА Ядро физикаси институти илмий тадқиқот ишлари режасининг Ф2-ФА-Ф119 “Ti асосидаги суқилмали бирикмаларининг температура ва  $\gamma$ -радиация таъсирида вужудга келадиган кристалл структураларининг ҳосил бўлиш қонуниятларини нейтронлар дифракцияси ёрдамида ўрганиш” (2012-2016); ОТ-Ф2-22 “Кристалл атомларининг иссиқлик тебранишлари назариясини ривожлантириш” (2017-2020); 2019 йил 21 ноябрдаги № ПҚ-4526 Президент Қарори билан тасдиқланган мавзу бўйича илмий ишлар дастури: “Титан асосидаги икки хил металл ёки икки хил нометалл таркибли суқилма бирикмаларнинг кристалл панжараларини ва фазавий ҳолат ўзгаришларини нейтронография усули билан ўрганиш” (2020-2024) мавзуларидаги лойиҳалар доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади**  $TiC$  титан карбиди асосида икки подрешеткали металллардан (Ti, Mo) ва нометалллардан (C, H) ташкил топган бирикмаларнинг кристалл тузилиши ҳамда фаза ўзгаришлар қонуниятларини аниқлашдан иборат.

#### **Тадқиқотнинг вазифалари:**

ностехиометрик  $TiC_x$  титан карбиднинг кристалл тузилишига турли хил миқдордаги водород атомларининг таъсирини нейтронография усули билан тадқиқ қилиш;

турли миқдордаги водород бўлган  $TiC_xH_y$  титан карбиддаги структуравий ҳолат ўзгаришларини 1475-300 К ҳарорат оралиғида

нейтронография усули билан ўрганиш;

TiC титан карбидида титан атомларининг бир қисмини Мо молибден билан алмаштиришнинг титан карбиди тузилишига ва айрим хоссаларига таъсирини ўрганиш ҳамда адабиётларда маълум бўлган миқдорга қараганда кўп миқдорда молибдени бўлган, механик хоссаси яхшиланган бирикма олишнинг шартларини топиш ва синтез қилиш;

Ti<sub>1-x</sub>Mo<sub>x</sub>C суқилма бирикмаларининг тузилишини ва элементар ячейкасининг хусусиятларини нейтронография усули билан аниқлаш;

Ti<sub>1-x</sub>Mo<sub>x</sub>C суқилма бирикмаларининг микроқаттиқлигини Виккерс усули билан тадқиқ этиш;

титан карбиддаги металл (Ti) атомларининг бир қисмини ёки нометалл (C) атомларининг бир қисмини бошқа турдаги атомлар билан алмаштиришнинг уч компонентли Ti<sub>0.75</sub>Mo<sub>0.25</sub>C, Ti<sub>0.70</sub>Mo<sub>0.30</sub>C, TiC<sub>0.50</sub>N<sub>0.50</sub> ва TiC<sub>0.30</sub>N<sub>0.70</sub> бирикмалардаги атомларнинг ўртача квадратик силжишига таъсирини аниқлаш.

**Тадқиқотнинг объекти** сифатида TiC<sub>x</sub> титан карбиди асосидаги икки подрешеткали металл (Ti, Mo) ва нометалл (C, N) суқилма бирикмалар олинган.

**Тадқиқот предметини** TiC<sub>x</sub> титан карбиди асосидаги икки подрешеткали уч компонентли (TiC<sub>x</sub>N<sub>y</sub>, Ti<sub>1-x</sub>Mo<sub>x</sub>C) суқилма бирикмаларнинг кристалл тузилиши ва улардаги фаза ўтишлари ташкил этади.

**Тадқиқот усуллари:** нейтронлар дифракцияси, рентгенография усуллари, нейтронструктуравий таҳлилнинг тўла профили таҳлил усули (FullProf), микроқаттиқликни аниқлашнинг Виккерс усули.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

юқори ҳароратли TiC<sub>0.50</sub>N<sub>y>0.22</sub> титан карбогидриди фазо гуруҳи (фаз. гур.) *Fd $\bar{3}m$*  бўлган тартибланган тузилишга ва даври  $P = 16$  бўлган тартибланган антифазавий доменларига эга эканлиги кўрсатилган;

Ti-C-N системасида ўтиш схемаси ва фазавий таркиби водород миқдорига ҳамда ҳароратга боғлиқ бўлган бир қатор кетма-кет босқичли (эволюциявий) фаза ўтишлари кузатилган;

TiC<sub>0.50</sub>N<sub>y</sub> карбогидридда нометалларнинг  $x=N/Ti \geq C/Ti=0.50$  муносабатни қаноатлантирувчи таркибларида сингонияси ва панжара доимийси кескин ўзгарувчи томонлари марказлашган куб (*Fm $\bar{3}m$*  фаз. гур.) фазадан гексагонал структурали (*P $\bar{3}m1$*  фаз. гур.) фазага водород миқдори бўйича I тур миқдорий фаза ўтиши аниқланган;

томонлари марказлашган куб структурали TiC титан карбидида Ti атомларини 30 %гача Мо атомлари билан алмаштириш мумкинлиги асослаб берилган ва юқори ҳароратли (2475 K) қиздириш йўли билан мос пропорциядаги титан ҳамда молибден карбидларининг куқунларидан Ti ва Мо ўрин алмашувчи қаттиқ эритмалар матрицасида юқори қаттиқликка эга кўш металл карбиди олинган.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** қуйидагилардан иборат:

нейтронлар дифракцияси маълумотлари асосида энг кичик квадратлар ва

дифрактограмманинг тўла профилли таҳлил усуллари билан  $Ti_{0.75}Mo_{0.25}C$  ва  $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$  бирикмаларида атомларнинг тўла (динамик+статик) ўртача квадратик силжишлари аниқланиб, улар TiC титан карбидидагига нисбатан 30 % катта эканлиги кўрсатилган;

куб структурали титан карбидидаги металл (Ti) ва нometалл (C) атомларини ташқи валент электронлари конфигурацияси билан фарқ қилувчи бошқа хил атомлар билан алмаштириш уч компонентли  $Ti_{0.75}Mo_{0.25}C$ ,  $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ ,  $TiC_{0.50}N_{0.50}$  ва  $TiC_{0.30}N_{0.70}$  суқилма қотишмаларда уларнинг панжараларида статик бузилишларнинг пайдо бўлишига олиб келиши кўрсатилган, бу маълумот кристалл панжаранинг динамик характеристикаларини ўзгартириш усули бўлиши мумкин;

$TiC_{0.50}N_{0.50}$  таркибли титан карбогидридидан юқори ҳароратли водород резервуари сифатида фойдаланиш мумкинлиги кўрсатилган.

**Олинган натижаларнинг ишончлилиги** бир хил тартибли кристалл панжарада оғир металллар ва енгил нometалллар атомларига (C ва N) ўта сезгир бўлган нейтрон дифракцияси усулини қўллаш; дифрактограммаларни Халқаро Кристаллографлар жамияти томонидан тавсия этилган “FullProf” программасида таҳлил қилиш, хулосаларнинг қаттиқ жисмларда фаза ўтишлари ва панжаранинг иссиқлик тебранишлари назарияларининг асосий қоидалари билан мос келиши, конденсирланган ҳолатлар физикасининг умумий қабул қилинган замонавий тушунчаларига зид келмаслиги билан асосланади.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.**  $TiC_xN_y$  титан карбогидридларининг панжарасида водород атомларининг тақсимланиши ва унинг кенг оралиқда таркибининг ўзгариши структуравий фаза ўтишларига ҳамда тартибланган антифазавий доменларининг шаклланишига таъсирини ўрганиш натижалари қийин эрувчи бирикмалар физикаси соҳасидаги қимматли ва янги маълумотлар бўлиб, суқилма фазаларидаги фаза ўтишлар назариясини янги тажрибавий маълумотлари билан бойитади. Титан карбидида титан атомларининг 30 %гача молибден атомлари билан алмаштириш мумкинлигини илмий асослаш ва тажрибада тасдиқлаш, унинг структураси ва атомларнинг ўртача квадратик силжишини ташкил этувчилар валент электронлар сонига боғлиқлигини кўрсатиш суқилма фазаларда фазанинг шаклланиш назариясини бойитади. Шунингдек, олинган янги натижалар суқилма бирикмалар физикасидаги янги тажрибавий маълумотлар бўлиб, улардан ОТМда конденсирланган ҳолат физикаси фанидан ўқитиш учун фойдаланиш мумкин.

Тадқиқот натижалари амалий аҳамиятга эга бўлиб, кукунли металлургия ва водород материалшунослиги билан шуғулланадиган технологлар учун қимматли маълумотлар ҳисобланади,  $Ti_{1-x}Mo_xC$  бирикмаси билан амалда ишлатилаётган таркибида танқис вольфрам бўлган бирикмаларни алмаштириш мумкин.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Титан карбиди асосидаги икки подрешеткали металл ва нometалл бирикмаларининг

кристалл тузилиши ҳамда фаза ўтишлари тадқиқ қилинган натижалари Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус Таълим Вазирлиги томонидан ОТМ талабалари ҳамда ёш тадқиқотчилар учун тавсия этилган “Qattiq jism fizikasi” (И.Хидиров. – Тошкент: Мумтоз сўз, 2019. – 388 б.) ўқув қўлланмасига киритилган (Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2018 йил 14 июндаги 531-сонли буйруғига асосан берилган гувоҳномаси). Натижалар титан карбиди асосидаги икки подрешеткали металл ва нометалл бирикмаларининг кристалл тузилишини тадқиқ қилишга хизмат қилган.

юқори ҳароратли  $TiC_{0.50}N_{y>0.22}$  титан карбогидриди тартибланган структурага ( $Fd\bar{3}m$  фаз. гур.) ва  $P=16$  даврли тартибланган антифазавий доменларга эга эканлиги ҳақидаги маълумотлар “Конденсирланган ҳолат физикаси” курси бўйича бакалаврият ва “Конденсирланган ҳолат физикаси ва материалшунослик” махсус курси бўйича магистратура дастури доирасида ўқув жараёнида қўлланилган (Ажинияз номидаги Нукус давлат педагогика институтининг 11.01.2022 йилдаги № 01-20-09/51-сон ва Фарғона давлат университетининг 15.01.2022 йилдаги № 01-117-сон маълумотномалари). Илмий натижаларнинг қўлланилиши талабаларнинг конденсирланган ҳолат физикасининг замонавий муаммолари тўғрисидаги тасаввурларини чуқурлаштириш имконини берган;

$Ti-C-N$  тизимида кузатилган қатор кетма-кет босқичли (эволюциявий) фаза ўтишлари ва I тур концентрациявий фаза ўтишини аниқлаш ҳақидаги маълумотлар “Конденсирланган ҳолат физикаси” курси бўйича бакалаврият ҳамда “Конденсирланган ҳолат физикаси ва материалшунослик” махсус курси бўйича магистратура дастури доирасида ўқув жараёнида фойдаланилган (Ажинияз номидаги Нукус давлат педагогика институтининг 11.01.2022 йилдаги № 01-20-09/51-сон ва Фарғона давлат университетининг 15.01.2022 йилдаги № 01-117-сон маълумотномалари). Илмий натижаларнинг қўлланилиши талабаларга қаттиқ жисмлардаги фазавий ўзгаришлар тўғрисидаги тушунчаларни кенгайтиришга ёрдам берган;

кўрсатилган ТМК титан карбидидаги титан атомларининг бир қисмини Мо атомлари билан алмаштириш мумкинлиги ва юқори ҳароратли қиздириш орқали ўрин алмашинувчи қаттиқ бирикма матрицасида ўта қаттиқ суқилма бирикмасини олиш имкониятининг илмий янгиликлари “Конденсирланган ҳолат физикаси” курси бўйича бакалаврият ва “Конденсирланган ҳолат физикаси ва материалшунослик” махсус курси бўйича магистратура дастури доирасида ўқув жараёнида қўлланилган (Ажинияз номидаги Нукус давлат педагогика институтининг 11.01.2022 йилдаги № 01-20-09/51-сон ва Фарғона давлат университетининг 15.01.2022 йилдаги № 01-117-сон маълумотномалари). Илмий натижаларнинг қўлланилиши талабаларни конденсирланган ҳолат физикасининг янги аниқланган хусусиятлари билан таништиришга ва уларнинг фаза ўтишлари ҳақидаги тасаввурларини кенгайтиришга хизмат қилган, замонавий конденсирланган ҳолат

физикасининг муаммолари тўғрисидаги тушунчаларини бойитишга имкон берган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Тадқиқот натижалари 6 та халқаро ва республика илмий-амалий конференцияларида муҳокама қилинган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши.** Диссертация мавзуси бўйича жами 13 та илмий иш нашр этилган, жумладан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш учун тавсия этилган илмий журналларда 7 та мақола, шулардан, 3 таси ҳорижий журналларда чоп қилинган.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса ва фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг ҳажми 98 бетни ташкил этади.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

**Кириш** қисмида олиб борилган тадқиқотнинг долзарблиги ва ишончилиги асосланган. Ўзбекистон Республикасида фан ва техника тараққиётининг асосий устувор йўналишлари билан боғлиқлиги кўрсатилган. Муаммонинг ўрганилганлик даражаси муҳокама қилинган, диссертация ишининг мақсади ва вазифалари, янгилиги, тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти кўрсатилган. Тадқиқот натижаларининг апробацияси, шунингдек, диссертация тузилиши ва ҳажми ҳақида қисқача маълумотлар келтирилган.

Диссертация ишининг **“TiC титан карбиди асосидаги икки подрешеткали металл ва нометалл таркибли бирикмаларнинг кристалл тузилиши ҳамда фаза ўзгаришлари”** номли биринчи бобида икки нометалл подрешеткали  $TiC_xH_y$  ва икки металл подрешеткали  $Ti_{1-x}Mo_xC$  карбидларнинг кристалл тузилиши ҳамда фаза ўтишлари ҳақидаги адабиётлар шарҳи кўриб чиқилган. Адабиётларда келтирилган маълумотларни таҳлил қилиш асосида тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари шакллантирилган.

Диссертациянинг **“Тажрибавий ва ҳисоблаш усуллари”** номли иккинчи боби нейтронографик тадқиқот усули ва нейтроноструктуравий таҳлил усулини тавсифлашга бағишланган. Нейтронограммаларни ва рентгенографияларни олиш шартлари тасвирланган. Ўрганилган намуналарни тайёрлаш ва баҳолаш ҳақида маълумот берилган.

Водород миқдорлари турли хил ( $y = 0.31 - 0.64$ ) бўлган  $TiC_{0.50}H_y$  титан карбогидридлари экзотермик реакция туфайли ўз-ўзидан тарқалувчи юқори ҳароратли ( $T_{экз.} \approx 2775 \text{ K} - 3270 \text{ K}$ ) синтез усули билан ПТЭМ маркали 99.76 масс. %ли тозаликдаги титан ва “ўта тоза” маркали углерод кукунларини доимий босим бомбасида ёндириш орқали (РФА Материалларнинг структуравий макрокинетикуси институтида) турли хил босимга эга водород муҳитида олинган.

$Ti_{1-x}Mo_xC$  намуналари тегишли пропорцияларда TiC ва MoC куб

карбидларининг кукунларини кукунли аралаштириб, металлургия (қиздириш) йўли билан олинган. Аралашган кукунлардан  $3 \times 10^6$  Н/м<sup>2</sup> босим остида цилиндрик брикет тайёрланиб, юқори ҳароратли СШВ-1.2.5/25 И1 юқори вакуумли печда графитдан ясалган стаканчада 8 соат давомида 2475 К ҳароратда қиздирилди ва печ билан биргаликда совутилди.

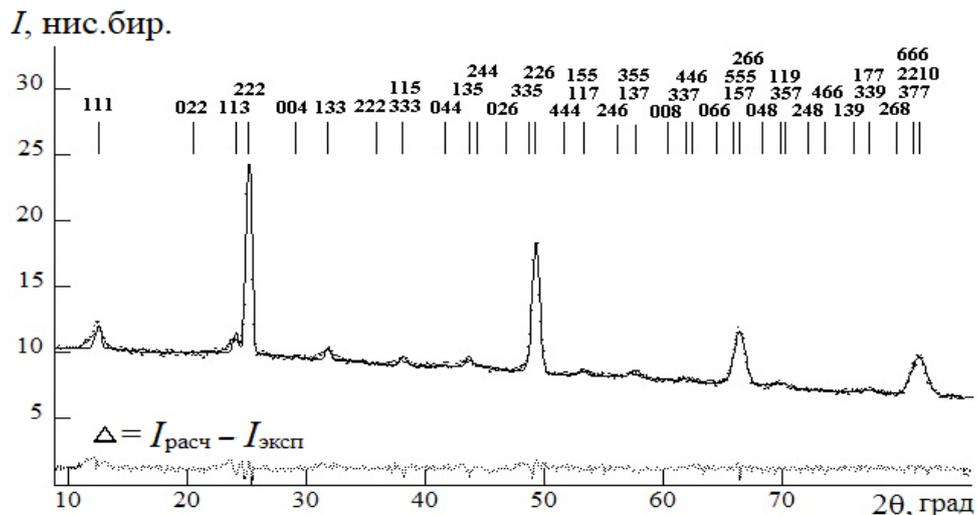
Водородли намуналарга термик ишлов бериш вакуум остида кавшарланган кварц ампулада SNOL туридаги печда ( $\Delta T = \pm 3$  °C) амалга оширилди. Кварц ампуласи вакуум остида кавшарланади. Бу ҳол водороднинг намуналардан чиқиб кетишига йўл қўймайди. Вакуум остидаги кварц ампулаларнинг ҳавосини сўриб олиш ва пайвандлаш махсус мослама билан жиҳозланган юқори вакуумли постда амалга оширилди.

Синтез қилинган намуналарнинг кимёвий таркиби кимёвий таҳлил усули билан, шунингдек, намунанинг нейтронграммасидаги диффракцион максимумларнинг тажрибавий ва ҳисобланган интенсивликларининг фарқини минималлаштириш орқали аниқланди. Кимёвий таҳлилнинг хатолиги 0.3 %ни ташкил этади. Намуналарнинг нейтронограммалари хона ҳароратида Фанлар академиясининг Ядро физикаси институтининг ВВР-СМ ядро реакторининг горизонтал каналига ўрнатилган ( $\lambda = 0.1085$  Å) DN-500 нейтрон диффрактометрида олинди.

Микроқаттиқлик HVS-1000 русумли дисплейли қаттиқлик тестерида Виккерс усули билан аниқланди. Олмос пирамида изининг ўлчаш аниқлиги  $\pm 0.2$  мкм.

Диссертация ишининг учинчи боби **“TiC<sub>x</sub>H<sub>y</sub> титан карбири асосида икки подрешеткали нометалл суқилма фазаларининг кристалл тузилиши ва фазавий ўтишлари”** деб номланади. Юқори ҳароратли водород резервуари нуқтаи назаридан водороднинг миқдори юқори бўлган кукунли кучли ностехиоетрик суқилма бирикмаларни олиш масаласи водород энергетикасида қизиқиш уйғотади. Бугунга қадар бундай муаммони ўрганиш водород миқдори кам бўлган TiC<sub>x</sub>H<sub>y</sub> ( $y \leq 0.21$ ) карбогидридларда бажарилган. Водороднинг бундай кичик миқдорлари водород ядроларида нейтронларнинг когорент сочилиш амплитудалари ( $b_H = - 0.374 \times 10^{-4}$  Å), Ti ядроларида сочилиш амплитудасига ( $b_{Ti} = - 0.34 \times 10^{-4}$  Å) яқин бўлгани учун водород атомларининг панжара тугунлари оралиғида жойлашувини аниқлаш аниқлигини ёмонлаштиради. Шунинг учун кўриб чиқилаётган масалани юқори миқдордаги водородли TiC<sub>0.50</sub>H<sub>0.50</sub> титан карбогидридида ўрганиш талаб қилинади. Нейтроноструктуравий таҳлилга асосан 1475 К дан тез совитилган TiC<sub>0.50</sub>H<sub>0.50</sub> намунаси бир фазали ( $a = 4.315 \pm 0.002$  нм) бўлиб, водород атомлари *Fm*  $\bar{3}$  *m* фаз. гур. да тетраэдр тугунлари оралиқларида жойлашади ва структурани аниқлашнинг ишончсизлик омили энг кичик қиймати  $R_{Br} = 5$  % бўлди. Демак, юқори ҳароратли TiC<sub>0.50</sub>H<sub>0.50</sub> таркибли намунада водород атомлари тетраэдр тугунлар оралиқларида жойлашади. Ушбу бирикма водород резервуари сифатида ўз структурасини сақлаб, узлуксиз сўриб олинди (p  $\approx 10^{-3}$  Па) вакуумда 5 соат давомида 675-725 К ҳароратларда водородни тўла қайтариб беради, сўнгра яна водород юта олади.

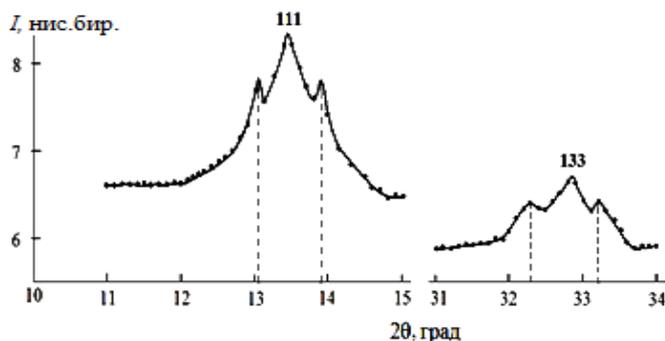
Одатда, юқори ҳароратда олинган  $\text{TiC}_{0.50}\text{H}_{y \leq 0.22}$  таркибли карбогидридлар тартибсизланган ТМК ( $Fm \bar{3} m$  фаз.гур.) структурага эга бўлади. Бирок водород миқдори юқори бўлган титан карбогидридлари, масалан,  $\text{TiC}_{0.50}\text{H}_{0.31}$  таркиблиси тартибланган ( $Fd \bar{3} m$  фаз.гур.) структурага ва тартибланган антифаза доменли (АФД) тузилишига эга бўлиши кўрсатилди. Ўз-ўзидан тарқалувчи юқори ҳароратли синтез усули билан олинган  $\text{TiC}_{0.50}\text{H}_{0.31}$  ва  $\text{TiC}_{0.50}\text{H}_{0.50}$  намуналарда қўшимча кичик максимумларга эга бўлган нейтронограммалари (1-расм) водород миқдори паст бўлган  $\text{TiC}_{0.50}\text{H}_{y \leq 0.22}$  намунанинг нейтронограммасидан фарқ қилади. Бу ҳол нометалл (С, Н) атомлари узоқ тартибга эга эканлигини кўрсатади. Бу фазанинг панжара доимийси  $a = 8.643(2) \text{ \AA} \approx 2a_0$ ,  $a_0$  тартибланмаган панжара доимийси. Нейтронограммага кўра (1-расм),  $\text{TiC}_{0.50}\text{H}_{0.31}$  тартибланган фазасининг структураси  $Fd \bar{3} m$  фаз. гуруҳга мансуб бўлиб,  $\text{TiC}_{0.50}\text{H}_{0.22}$  таркибли титан карбогидриди структураси 870-775 К паст ҳароратларда қиздиришдан кейингина тартибланган  $Fd \bar{3} m$  фаз. гуруҳга ўтади. Ушбу ишда келтирилган моделга кўра, углерод атомлари  $Fd \bar{3} m$  фаз. гуруҳда, асосан, 16с октаэдр тугунлар оралиқларида, қолган оз сонли углерод атомлари ва водород атомлари эса бошқа 16d турдаги октаэдр тугунларини эгаллайди.



**1-расм.  $\text{TiC}_{0.50}\text{H}_{0.31}$  титан карбогидридининг ўз-ўзидан тарқалувчи юқори ҳароратли синтез усули билан олингандан кейинги бошланғич нейтронограммаси ( $Fd \bar{3} m$  фаз. гур.)**

Бирок ушбу модел доирасида нейтроноструктуравий таҳлил усули билан ишончсизликнинг мақбул омилини олиш мумкин бўлмади. Келтирилган моделдаги дифракцион максимумларнинг экспериментал ва назарий ҳисобланган интенсивликларининг номуносивлиги ўрганилаётган намунада тартибли АФД ҳосил бўлиши билан изоҳланади. Дарҳақиқат, 1- ва 2-расмлардан кўриниб турибдики, тоқ Миллер индексларига эга бўлган қўшимча кичик максимумларнинг уч қисмга симметрик ажралиши кузатилади ва уларнинг профиллари ҳисобланганидан фарқ қилади. Қўшимча кичик максимумларни ажралиши намунада даврий тартибланган АФД ҳосил

бўлганлигини кўрсатади. Қўшимча кичик максимумлар шаклининг бузилишига турли АФД ларга мос келадиган атом текисликларининг бироз фарқли тизимлари сабаб бўлади. Водород миқдори  $H/Ti \leq 0.22$  бўлган  $TiC_{0.50}H_y$  да АФД ни тартибланиши учун 870 К ҳароратда 24 соат қиздириш талаб қилинар эди.



**2-расм.  $TiC_{0.50}H_{0.31}$  титан карбогидриднинг нейтронограммасидаги 111 ва 133 индексли қўшимча кичик максимумларнинг учга ажралиши**

Тартибланган АФД нинг даври  $P$  133 индексли максимум орқали қуйидаги ифода бўйича аниқланди:

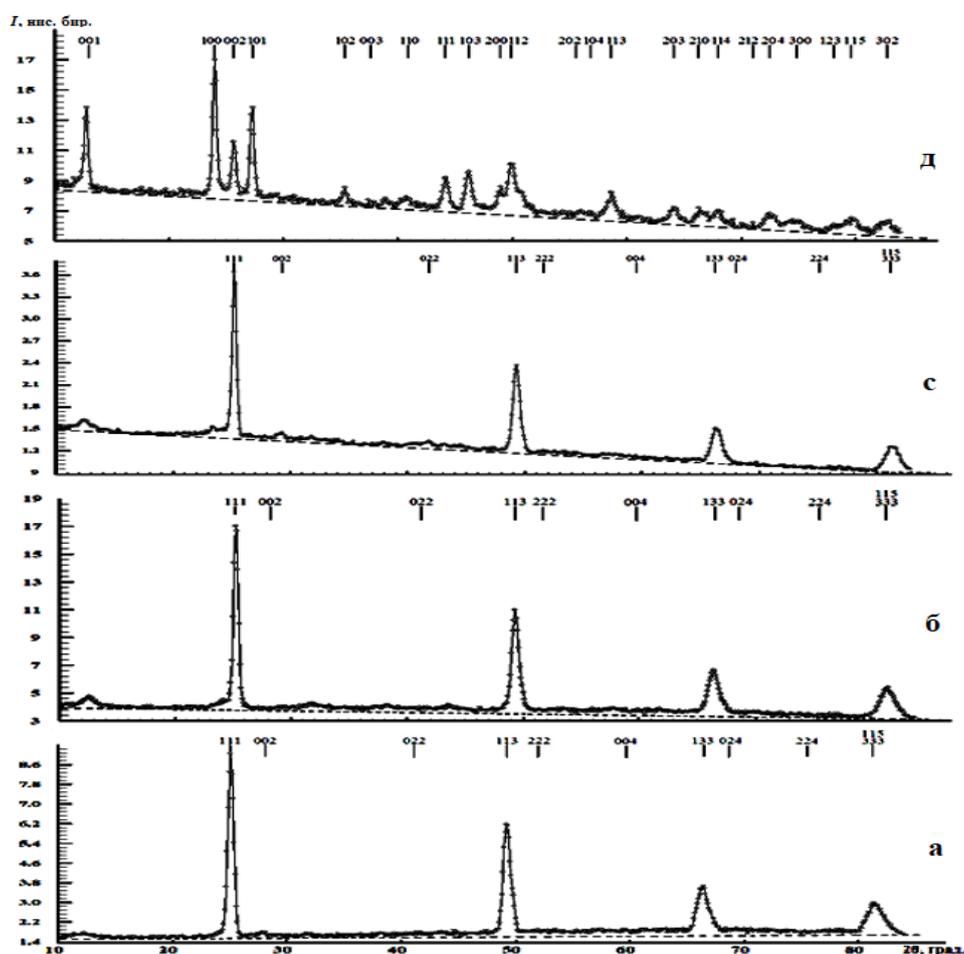
$$P = \lambda^2/a_0^2 (\sin^2 \theta_2 - \sin^2 \theta_1) \quad (1)$$

бу ерда  $\lambda$  – нейтрон тўлқин узунлиги,  $a_0 - Fm\bar{3}m$  фаз. гур. учун аниқланган панжара доимийсининг параметри;  $\theta_2$  ва  $\theta_1$  – АФД структураси даврининг узайиши туфайли юзага келадиган сателитларнинг Брэгг бурчаклари. АФД структурасининг  $P$  даври 16 га тенг бўлиб чиқди, бу  $H/Ti \leq 0.22$  миқдори бўлган титан карбогидридаги тартибланган АФД давридан анча каттароқдир ( $P_{ср}=11$ ). Бу ҳол кам водород таркибига эга  $TiC_{0.50}H_{0.22}$  титан карбогидридларига нисбатан водород миқдори юқори бўлган  $TiC_{0.50}H_{0.31}$  титан карбогидридида тартибланган ҳолатга ўтиш ҳарорати юқорироқ бўлиб, синтездан кейин совутиш жараёнида нометалларнинг тартибланган ҳолатга ўтишга улгуришини кўрсатади.

Водород миқдори юқори бўлган  $TiC_{0.50}H_{0.31}$  ва  $TiC_{0.50}H_{0.50}$  карбогидридларда юқори ҳароратларда водород қайси тугун оралиқларида эканлигини аниқлаш учун бу намуналар вакуум остида кавшарланган кварц ампулада 1475 К ҳароратда 6 соат қиздириб, сувда тобланди. Уларнинг нейтронограммаларини ҳисоблашлар шуни кўрсатдики, бундай ҳароратларда водород атомларининг ҳаммаси тетраэдр тугун оралиқларига ўтар экан. Аммо водороднинг эквиатомли  $TiC_{0.50}H_{0.50}$  таркибидан юқори таркибли  $TiC_{0.50}H_{0.55}$  ва  $TiC_{0.50}H_{0.60}$  карбогидридларини нейтронографик таҳлилга кўра, синтез қилинган намуналарнинг кристалл тузилиши  $P\bar{3}m1$  фаз. гур. доирасида ифодаланувчи гексагонал тузилишга эга эканлиги маълум бўлди. 3д-расмда  $TiC_{0.50}H_{0.55}$  намунасининг нейтронограммаси кўрсатилган, бу панжарада водород ядролари томонидан нейтронларнинг сочилиши натижасида некогерент фон кузатилади, унинг интенсивлиги Брэгг бурчаги

ортиши билан камаяди. Намунада водород қанча кўп бўлса бу фон шунча кучли бўлади.

Шундай қилиб, биз  $\text{TiC}_{0.50}\text{H}_y$  карбогидридида водороднинг  $y > 0.50$  миқдорида ТМК → ЗТГ (Зич тахланган гексагонал) миқдорий фазавий ўтишини кузатамиз. Таклиф этилаётган усул доирасида элементар ячейкада Ti атомлари  $1/3, 2/3, z_{\text{Me}} = 0.234 \pm 0.002$ ;  $2/3, 1/3, z_{\text{Me}} = 0.745 \pm 0.002$  координатали бошқа  $2(d)$  ҳолатни; водород (H) атомлари  $1/3, 2/3, z_1 = 0.632 \pm 0.002$ ;  $2/3, 1/3, z_1 = 0.368 \pm 0.002$  координатали бошқа  $2(d)$  ҳолатни эгаллайди. ЗТГ фазасининг структуравий формуласи қуйидаги кўринишга эга бўлади:  $\text{Ti}_2\text{CH}_{2-x}$  (бу ерда  $x = 0 - 0.90$ ).



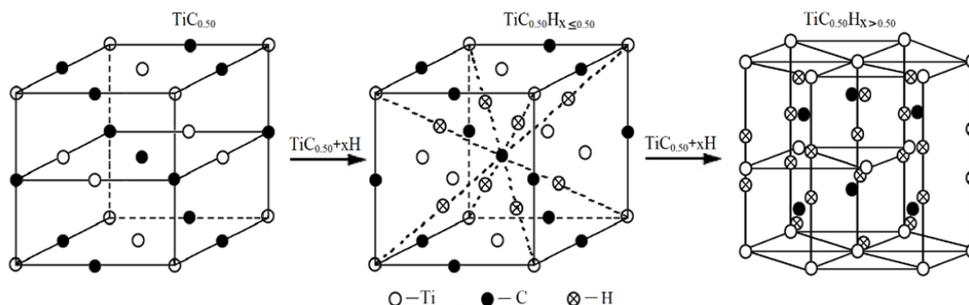
**3-расм. Нейтронограмма: а –  $\text{TiC}_{0.50}$ , б –  $\text{TiC}_{0.50}\text{H}_{0.21}$ , с –  $\text{TiC}_{0.50}\text{H}_{0.50}$ , д –  $\text{TiC}_{0.50}\text{H}_{0.55}$ . Рефлекс максимумлар тепасида  $Fm\bar{3}m$  (а, б ва с нейтронограммалар) ва  $P\bar{3}m1$  (д нейтронограмма) фазавий гуруҳларга муносиб Миллер индекслари қўйилган**

Олинган фазаларни вакуум остида кавшарланган кварцли ампулада 1700300 К ҳароратда 100 К қадам билан ҳар бир ҳароратда 24 соатгача қиздириш бу фазанинг кристалл тузилишининг ўзгаришига олиб келмади. Демак, унинг водород ажралиб чиқишига тўсқинлик қиладиган ёпиқ ҳажмдаги кристалл тузилиши барқарордир. Табиийки, унинг вакуумдаги

иссиқлик барқарорлигини ўрганиш қизиқиш уйғотади. Вакуумдаги термал барқарорликни ўрганиш учун ушбу ЗТГ фазаси  $5.3 \times 10^{-3}$  Па вакуумда қиздирилди. Қаттиқ қотишмаларни вакуумда иссиқлик билан ишлов бериш хона ҳароратидан бошлаб ундан юқори ҳароратларда ҳар бир ҳароратда аввал 24 соат, сўнгра 48 соат давомида амалга оширилди. Вакуумда қиздиргандан кейин намуналардаги водород миқдори камайганлиги учун уларнинг нейтронограммаларида нокогерент фоннинг пасайиши кузатилади. Нейтронограммаларнинг таҳлилига кўра, ўрганилган қаттиқ қотишмаларда 525 К ҳароратгача водороднинг иссиқлик эмиссияси деярли содир бўлмайди. 550 К ҳароратдан бошлаб,  $TiC_xH_y$  карбогидридининг тоза  $\alpha-Ti$  ва ТМКларга ажралиши аниқланди. Ҳароратнинг янада ошиши билан ажраладиган фазалар сони ортади. Бинобарин, таркибида углерод ва водород юқори бўлган  $Ti_2CH_{2-x}$  бирикмалар вакуумда фақат  $T < 550$  К ҳароратда термик барқарор бўлади. Шунинг учун уни водород резервуари сифатида ишлатиш мумкин эмас, чунки юқорироқ ҳароратда структура ўзгариб кетади. Бироқ улар ядровий энергетик транспорт қурилмаларида, ихчам ядро реакторларида нейтронлардан ва  $\gamma$  - нурлардан ҳимояланиш воситаси сифатида ишлатилиши мумкин. Чунки бу бирикмада шундай мақсадда ишлатиладиган  $TiH_2$  титан дигидридига қараганда кучлироқ боғланган Н билан бирга нейтронларни секинлаштирувчи (С) углерод атомлари ҳам мавжуд ва ҳароратга чидамлилиги  $TiH_2$  дигидридига (475 К) нисбатан юқори.  $TiC_{0.50}H_{y \geq 0.50}$  да фазавий ўтиш симметрия (панжара доимийси) кескин (сакраб) ўзгаргани учун биринчи турдаги фазавий ўтиш ҳисобланади.

Шундай қилиб, биринчи марта  $Ti-C-H$  системасида (ТМК)  $\rightarrow$  (ЗТГ) водород бўйича I тур миқдорий фаза ўтиши кузатилди.

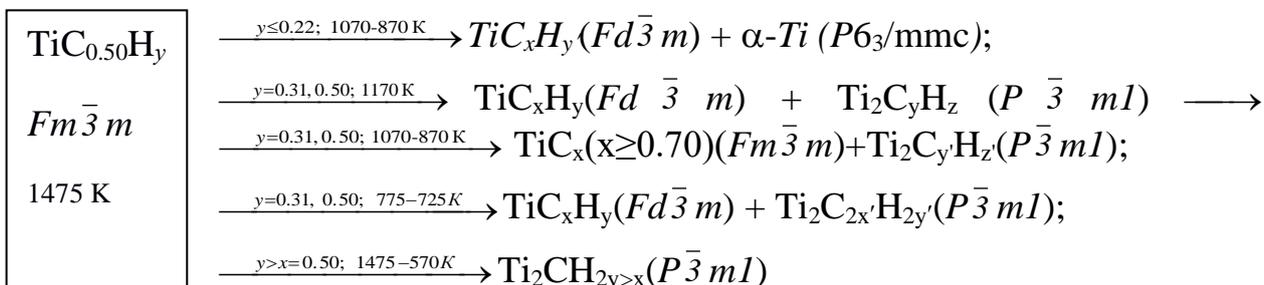
4-расмда  $TiC_{0.50}$ , карбиди  $TiC_{0.50}H_{x \leq 0.50}$  ва  $TiC_{0.50}H_{x > 0.50}$  карбогидридларнинг элементар ячейкалари кўрсатилган. Кўпчилик карбогидридлар юқори ҳароратларда олинганлиги учун уларни термодинамик мувозанатга келган ҳолатини ўрганиш учун  $1270 \text{ K} \rightarrow 1170 \text{ K} \rightarrow 1070 \text{ K} \rightarrow 970 \text{ K} \rightarrow 870 \text{ K}$  ҳароратларнинг ҳар бирида 24 соатдан 100 К қадам билан вакуум остида кавшарланган кварц ампулада қиздирилди.



**4-расм.  $TiC_{0.50}$ , карбиди ва  $TiC_{0.50}H_{x \leq 0.50}$ ,  $TiC_{0.50}H_{x > 0.50}$  ( $Ti_2CH_{2-x}$ ) карбогидридларнинг элементар ячейкалари**

5-расмда ана шундай қиздиришдан кейинги фазавий таҳлил натижалари умумлаштирилган. Ўтказилган тадқиқот натижаларига кўра, титан

карбидининг  $TiC_x$  нинг ТМК фазаси гомогенлик соҳасининг қуйи чегарасида водород паст ҳароратларда ( $T \leq 1170 K$ ) унинг гомогенлик соҳасининг камайишига ва бир неча фазаларга парчаланишига олиб келади, деган хулоса келиб чиқади. Парчаланган бирикмаларнинг фазавий таркиби эволюциявий бўлиб, водород миқдорига ва термик ишлов бериш ҳароратига боғлиқ бўлади.

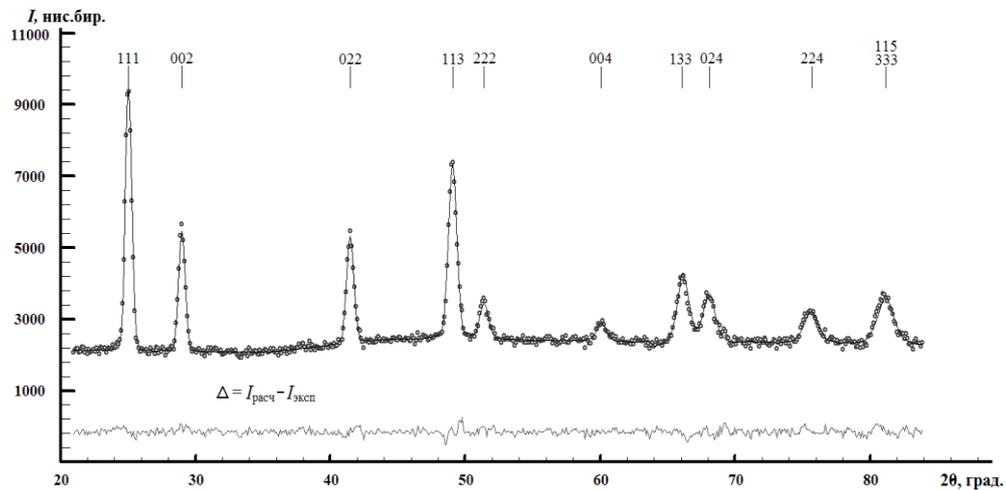


### 5-расм. $TiC_{0.50}H_y$ карбогидрида водород миқдорига ва ҳароратга боғлиқ ҳолда структуравий фаза ўтишларининг эволюциявий схемалари

Диссертация ишининг “ $Ti_{1-x}Mo_xC$  бирикмасининг кристалл тузилиши ва хусусиятлари” номли тўртинчи бобида  $Ti_{1-x}Mo_xC$  бирикмасининг нейтронографик тадқиқот натижалари келтирилган. Бугунги кунда вольфрамнинг кескин танқислиги туфайли вольфрам ёки вольфрам таркибли бирикмаларни алмаштирадиган бирикмаларни топиш долзарб масала бўлиб қолди. Шундай бирикмалардан бири  $Ti-Mo-C$  тизимида бўла олиши мумкин. Бугунги кунга қадар ушбу тизимнинг  $Ti_{0.90}Mo_{0.10}C$  таркибигача бир фазали куб фазаси олинган. Бизнинг таҳлил бошланғич материалларнинг таркибини ва юқори қиздириш ҳароратини ўзгартириб, куқунли металлургия усули орқали таркибида юқори миқдордаги молибден бўлган бирикмани олиш мумкинлигини кўрсатди. ТМК  $TiC$  титан карбиди ва  $MoC$  молибден карбиди изоструктурали бўлиб,  $NaCl$  туридаги ТМК панжарага эга, панжара доимийлари ( $TiC$  учун  $a = 4.3278 \text{ \AA}$  ва  $MoC$  учун  $a = 4.3210 \text{ \AA}$ ) яқин.  $Ti$  ва  $Mo$  нинг атом радиуслари ҳам яқин ( $1.47 \text{ \AA}$  ва  $1.40 \text{ \AA}$ ), узлуксиз қаттиқ қотишмани шаклланиши учун Вегард шартини қаноатлантиради. Демак, бир фазали куб структурали  $Ti_{1-x}Mo_xC$  олиш мумкин.

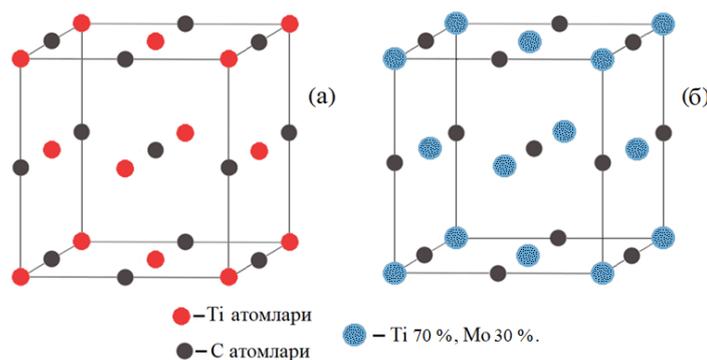
Нейтронограммага кўра, олинган  $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$  намунаси ТМК бир фазали эканлигини кўрсатади. Намунанинг нейтронограммаси уни  $Fm\bar{3}m$  фаз. гур.га тегишли эканлигини кўрсатди. 6-расмда биз таклиф қилган структура модели бўйича олинган бирикманинг экспериментда қузатилган ва назарий ҳисобланган нейтронограммалари кўрсатилган.

Ушбу моделда, 2.8 қисм  $Ti$  атомлари ва 1.2 қисм  $Mo$  атомлари бир-бири билан статистик аралашган ҳолда 4  $b$  позицияларда жойлашган; 4 та углерод атомлари эса 4  $a$  октаэдр позицияларида статистик жойлашган. 7-расмда ТМК  $TiC$  ва  $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$  қаттиқ қотишмаларнинг элементар ячейкалари тасвирланган.



**6-расм.  $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$  бирикмасининг нейтронограммаси, нуқталар – экспериментлар, тугаш чизик  $Fm\bar{3}m$  фазавий гуруҳ доирасида ҳисобланган нейтронограмма,  $\Delta$  - бу нейтронограмманинг экспериментал ва ҳисобланган қийматлари ўртасидаги фарқ. Дифракцион максимумлар устига  $Fm\bar{3}m$  фазавий гуруҳига мансуб Миллер индекслари қўйилган**

Қаттиқ жисмнинг фундаментал хоссаларидан бири иссиқлик тебранишлари туфайли унинг атомларининг мувозанат ҳолатидан ўртача квадратик силжиши (ЎКС)дир.  $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$  ва  $Ti_{0.75}Mo_{0.25}C$  бирикмаларининг нейтронограммалардаги дифракцион чўққиларнинг аниқ ҳамда кучли интенсивликка эгалиги ушбу бирикмаларда атомларнинг ўртача квадратик силжишини нейтронограммалари орқали юқори аниқлик билан аниқлашга имкон беради.



**7-расм.  $TiC$  (а) ва  $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$  (б) бирикмаларининг элементар ячейкалари**

Поликристалл цилиндрсимон намуна учун экспериментда кузатилган куб структура учун нейтрон диффракцияси максимумларининг интенсивлиги  $Fm\bar{3}m$  фаз.гур. учун қуйида келтирилган ифода билан аниқланади:

$$I_{\text{эксп}} = kI_0 \exp\left(-\frac{16\pi^2 u_{\Sigma}^2 \sin^2 \theta}{3 \lambda^2}\right) \quad (2)$$

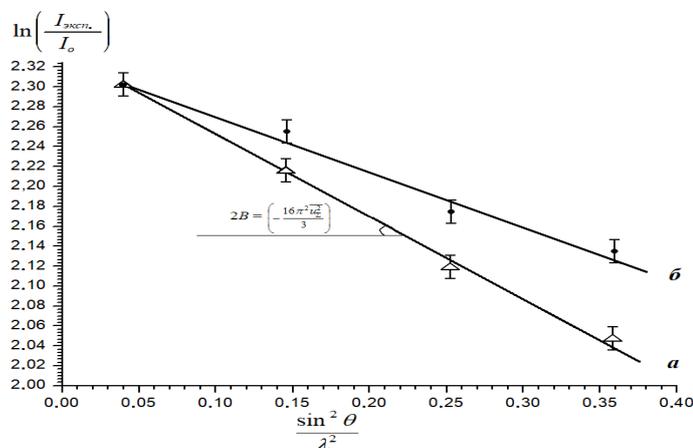
бу ерда  $k$  – курилманинг ва намунанинг геометриясига боғлиқ бўлган коэффициент;  $\overline{u_{\Sigma}^2} = \frac{\overline{u_{Ti}^2} + \overline{u_{Mo}^2} + \overline{u_C^2}}{3}$  атом мажмуасининг (бундан кейин атом)

ўртача квадратик силжиши, бундан ташқари, уларнинг ҳар бири  $\overline{u_i^2}$  ташкил этган атомларнинг иссиқлик тебранишларининг ўртача квадрат амплитудасидан ва панжаранинг статик бузилишидан иборат:  $\overline{u_i^2} = \overline{u_{дин.}^2} + \overline{u_{ст.}^2}$ . Атомлар ўлчамидаги фарқлар ва бирикма таркибининг стехиометриядан четланишлари туфайли атомларнинг идеал ҳолатдан статик силжиши содир бўлади. (2) ифодага кўра  $\ln(I_{экс.}/I_{расч.})$ нинг  $\sin^2\theta/\lambda^2$  га боғлиқлик графиги тўғри чизиқли бўлиб, унинг қиялиги  $B$  иссиқлик факторини аниқлаш имконини беради:

$$B = (8\pi^2 \overline{u^2} / 3) \quad (3)$$

Кейин (3) формуладан фойдаланиб  $\overline{u_{\Sigma}^2}$  ўртача квадратик силжишни аниқлаймиз. Куб кристалларда атомларнинг ЎКС аниқлашнинг бу усули сўнгги пайтларда нейтронографияда кенг қўлланилиб, умум эътироф этилган усулга айланди.

8-расмда  $\ln(I_{экс.}/I_{расч.})$  ни  $\sin^2\theta/\lambda^2$  га боғланиши келтирилган.  $\sin^2\theta/\lambda^2$  функциядаги  $\ln(I_{экс.}/I_{расч.})$  тўғри чизиқнинг қиялиги энг кичик квадратлар усули билан аниқланди.



**8-расм. а)  $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$  ва б)  $Ti_{0.75}Mo_{0.25}C$  бирикмалар учун  $\ln(I_{экс.}/I_0)$  ифоданинг  $\sin^2\theta/\lambda^2$  га боғланиши. Нуқталар устида  $Fm\bar{3}m$  фаз. гур.га тегишли  $hkl$  Миллер индекслари кўрсатилган**

1-жадвалда ушбу намуналарда  $\overline{u_{\Sigma}^2}$  учун олинган қийматлар келтирилган. 1-жадвалдан  $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$  карбидадаги атомлар титаннинг стехиометрик  $TiC_{0.50}N_{0.50}$  ва  $TiC_{0.30}N_{0.70}$  карбонитридларининг атомларидан кўп фарқ қилмаслигини кўриш мумкин. Бу қийматлар орасидаги фарқ 5 %дан ошмайди, яъни бу қийматларни аниқлашдаги хатоликлар оралиғида ётади. Шу билан бирга бу қийматлар фарқи  $TiC_{0.97}$  ва  $TiN_{0.97}$  намуналарнинг ўртача

квадратик силжишлари билан қиёсланганда мос равишда 31 % ва 24 %га ортик. Ўртача умумий ЎКС ортишини иссиқлик тебранишлари амплитудасининг ошиши билан изоҳлаб бўлмайди. Чунки у, қоида тариқасида, элемент массасига тескари пропорционалдир ва бу ҳолда нисбатан енгил массали Тi атомларининг сезиларли қисми 30 % оғир Мо атомлари билан алмаштирилган. Демак, тўла ўртача квадратик силжиш динамик силжишлар ҳисобига эмас, статик силжишлар ҳисобига ортади.

#### 1-жадвал

#### Турли карбид ва нитридларнинг панжарадаги атомларининг ўртача квадратик силжиши, микроқаттиқлиги ва панжара доимийлари

№	Намуна	$\sqrt{u_z^2}$ , Å	Панжара доимий а, Å	Hv, ГПа
1	Ti <sub>0.70</sub> Mo <sub>0.30</sub> C	0.110± 0.003	4.338±0.001	38±1.7
2	Ti <sub>0.75</sub> Mo <sub>0.25</sub> C	0.101± 0.003	4.330±0.001	33.3±1.5
3	TiC <sub>0.96</sub>	0.084± 0.003	4.326±0.001	31.7±1.7
4	TiN <sub>0.97</sub>	0.089± 0.002	4.226±0.003	20.5
5	TiC <sub>0.50</sub> N <sub>0.50</sub>	0.105± 0.001	4.302±0.002	
6	TiC <sub>0.30</sub> N <sub>0.70</sub>	0.105± 0.001	4.302±0.002	
7	WC	0.058± 0.003	4.215±0.001	17.2

Бундан ташқари, Ti<sub>0.70</sub>Mo<sub>0.30</sub>C карбидининг микроқаттиқлиги аниқланди. Цилиндрсимон намунанинг ўлчами 15×10 мм<sup>2</sup> эди. Ўлчашлар 20 марта такрорланди ва ҳар сафар микроқаттиқлик аниқланганда ўртача қиймат олинди.

Ti<sub>0.70</sub>Mo<sub>0.30</sub>C карбидининг микроқаттиқлиги H = 38±1.4 ГПа, Ti<sub>0.75</sub>Mo<sub>0.25</sub>C таркиби учун эса H = 33±1.4 ГПа ни ташкил этди. Таққослаш учун шуни таъкидлаймизки, соф TiC нинг микроқаттиқлиги H = 32±1.7 ГПа, WC учун эса H=17±1.7 ГПа. Уларнинг динамик характеристикаларини таққослаш Ti<sub>0.70</sub>Mo<sub>0.30</sub>C карбидида TiC карбидига нисбатан статик силжишларнинг (бузилишларнинг) катта бўлиши микроқаттиқликнинг ортишига олиб келади, деган хулоса қилишга имкон беради.

## ХУЛОСА

“Титан карбиди асосидаги икки подрешеткали металл ва нометалл бирикмаларининг кристалл структураси ва фаза ўтишлари” мавзусидаги физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси доирасида ўтказилган тадқиқотлар асосида қуйидагича хулосалар қилиш мумкин:

1. Томонлари марказлашган куб (ТМК) элементар ячейкали эквиатом таркибли  $TiC_{0.50}H_{0.50}$  карбогидрид мисолида юқори ҳароратда ( $T=1170$  К) водород атомларининг кристалл панжаранинг тетраэдрик тугун ораликларида статистик жойлашуви кўрсатилди. Ушбу таркибли карбогидрид кристалл ТМК структурасини сақлаган ҳолда 675-725 К ҳароратларда водород атомларини тўла қайтариб беради ва унинг панжарасига қайтадан водород атомларини киргизиш мумкин бўлади.

2. Юқори ҳароратли синтез усули билан олинган  $TiC_{0.50}H_{0.31}$  таркибли титан карбогидридининг структураси тартибланган бўлиб (фазавий гуруҳи  $Fd\bar{3}m$ ), айти бир хил усул ва шароитда олинган водород миқдори кам бўлган  $TiC_{0.50}H_{y \leq 0.21}$  таркибли титан карбогидридининг структурасидан фарқ қилади.  $TiC_{0.50}H_{0.31}$  карбогидрид тартибланган структурага (фазавий гуруҳи  $Fd\bar{3}m$ ) ва  $P=16$  даврли тартибланган антифазали доменларга эга. Кузатилган фарқ таркибида водород атомлари кўп бўлган карбогидрид тартибланиш ҳолатига ўтишнинг бир мунча юқори ҳароратига эга эканлиги ва совутиш жараёнида нометалл атомларининг тартибланишга улгуриши билан тушунтирилади.

3. Юқори ҳароратли ТМК  $TiC_{0.50}H_y$  ( $y=0.31-0.50$ ) титан карбогидридининг фазаси метастабил ҳолатда бўлиб, паст ҳароратларда ( $T \leq 1170$  К) системанинг мувозанат ҳолатга ўтиши бир неча фазаларга парчаланиши билан содир бўлиб, ТМК  $TiC_{0.50}$  карбидининг мавжудлик соҳасининг торайишига сабаб бўлади. Парчаланган бирикманинг фазавий таркиби ундаги водород атомлари миқдorigа ва ҳароратга боғлиқ бўлиши кўрсатилди.

Юқори ҳароратли титан карбогидриди  $TiC_{0.50}H_y$  ( $y=0.31-0.50$ ) ҳарорат пасайиши билан фазавий мувозанат ҳолатига ўтиши босқичма-босқич бир неча фазалар орқали содир бўлиши, яъни фаза ўтишларининг эволюцияси кузатилади.

4. Биринчи марта  $TiC_{0.50}H_y$  титан карбогидридидаги водороднинг  $y > 0.50$  миқдорларида Ti-C-H системада ҳажмнинг кескин 40 % га камайиб углероднинг октаэдр, водороднинг эса тетраэдр қуршовлари ўзгармаган ҳолда содир бўладиган I тур миқдорий ТМК  $\rightarrow 3T\bar{T}$  фаза ўтиши кузатилди.

5. Ti ва Mo карбидларнинг майда кукунларини ( $r_{\text{ўпм}} = 40$  мкм) юқори ҳароратда (2475 К) қиздириш йўли билан куб TiC титан карбидидаги Ti атомларини 30 фоизгача Mo атомларига алмаштириш мумкинлиги кўрсатилди.

Бу бирикманинг кристалл структураси  $Fm\bar{3}m$  фаз. гур. мансуб бўлиб, Ti ва Mo атомлари ўзаро ўрин алмашувчи эритма ҳосил қилиб 4b

позицияларда, углерод атомлари эса 4a позицияларда статистик жойлашади. ТМК TiC титан карбиддаги титан атомларини 30 фоизгача Мо атомларига алмаштириш унинг структурасини ўзгартирмайди. Бу хол TiC асосида яхшиланган хоссали янги бирикма олишга имкон беради.

6.  $Ti_{1-x}Mo_xC$  бирикмасида атомларнинг мувозанат вазиятидаги тўла (динамик ва статик) ўртача квадратик силжишлари энг кичик квадратлар ва дифрактограмманинг тўла профилли таҳлилининг усуллари билан аниқланди.

TiC титан карбидидаги металлниг ва нометаллниг бир қисмини ташқи валент электронлари билан фарқ қилувчи бошқа тур атомлар билан алмаштириш уч компонентли  $Ti_{0.75}Mo_{0.25}C$ ,  $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ ,  $TiC_{0.50}N_{0.50}$  ва  $TiC_{0.30}N_{0.70}$  бирикмаларда кристалл панжарада статик бузилишлар пайдо бўлишига олиб келиши кўрсатилди.

7.  $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$  бирикмасининг микроқаттиқлиги TiC титан карбидининг микроқаттиқлигига нисбатан 19 %га кўп эканлиги аниқланди. Бунга сабаб уч таркибли бирикма панжарасида пайдо бўлган статик бузилишлар деган хулосага келинди. TiC кристалл панжарасида металл ёки нометалл атомларининг бир қисмини юқори валентликка эга бошқа тур атомлар билан алмаштириш кристалл панжаранинг динамик характеристикасини ўзгартириш усули бўлиши мумкин.

8. Тадқиқот натижаларини умумлаштириб айтиш мумкинки, ТМК TiC титан карбиди панжарасининг нометалл қисмида иккинчи хил нометалл турли миқдордаги водород атомлари бўлиши структурани нотурғунлигига олиб келиб, водород миқдори ва ҳароратга боғлиқ ҳолда турли хил фаза ўтишларига сабаб бўлади ҳамда титан карбидининг техникада ишлатилишига салбий таъсир қилади. Бироқ водороднинг айрим миқдорида ( $TiC_{0.50}H_{y \leq 0.50}$ ) водород энергетикасида ва водород материалшунослигида юқори ҳароратли водород резервуари сифатида ишлатилиши мумкин. Куб структурали TiC титан карбидида Ti атомининг бир қисмини Мо атомларига алмаштириш структурани нотурғунлигига олиб келмайди ва микроқаттиқликнинг 20 %гача ортишига олиб келади.

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

---

**ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

**РАХМАНОВ САЙФИДДИН ДЖУРАБОЕВИЧ**

**КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ  
СПЛАВОВ С ДВОЙНЫМИ ПОДРЕШЕТКАМИ МЕТАЛЛОВ И  
НЕМЕТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ТИТАНА**

**01.04.07 – Физика конденсированного состояния**

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

**Ташкент – 2022**

**Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером № В2021.4.PhD/FM249.**

Диссертация выполнена в Институте ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан.

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

<b>Научный руководитель:</b>	<b>Хидиров Ирисали</b> доктор физико-математических наук, профессор,
<b>Официальные оппоненты:</b>	<b>Джуманов Сафарали</b> доктор физико-математических наук, профессор, <b>Пайзуллаханов Мухаммаде-Султанхан Саидивалиханович</b> доктор технических наук, старший научный сотрудник
<b>Ведущая организация:</b>	<b>Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова</b>

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 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.: (+998) 71-289-31-41; факс: (+99871) 289-36-65; e-mail: [info@inp.uz](mailto: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 «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.  
(протокол рассылки No \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2022 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 (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В настоящее время уделяется большое внимание исследованию гранецентрированного кубического (ГЦК) карбида титана  $TiC_x$  переменного состава ( $x=0.33-1.00$ ). Такой большой интерес обусловлен комплексом его высоких характеристик, таких как тугоплавкость (выше 3270 К), жаростойкость, высокая твердость, коррозионная и радиационная стойкость. Кроме того, он обладает специфическими электрическими и магнитными свойствами. Самое важное то, что благодаря широкой области гомогенности эти ценные характеристики можно варьировать в широком диапазоне путем изменения содержания углерода в нем. Области применения ГЦК карбида титана  $TiC_x$  очень широки. Он применяется в промышленности и технике при экстремальных условиях, в кораблестроении и ракетостроении, инструментальной технике и медицине. Однако такой материал с таким большим стратегическим значением очень уязвим относительно примеси водорода. Даже небольшая примесь водорода в корне может изменить кристаллическую структуру карбида титана и соответственно может оказать разрушающее влияние на свойства. В то же время, в многочисленные октаэдрические и тетраэдрические междоузлия ГЦК карбида титана может быть внедрено большое количество атомов водорода из-за маленького атомного радиуса. Таким образом он может стать водородным резервуаром для использования в качестве источника водорода в водородной энергетике и водородном материаловедении.

На мировом уровне стало известно, что в ГЦК карбиде титана можно заменить значительную часть атомов титана на атомы молибдена, в результате чего образуется сплав, не уступающий по свойствам сплавам, содержащим остродефицитный вольфрам. Если в ГЦК карбиде титана водород образует сплав внедрения с двойными подрешетками неметаллов, то молибден образует тугоплавкий сплав внедрения с двойными подрешетками металлов. Из-за вышеперечисленных уникальных свойств изучение карбида титана с двойными подрешетками неметаллов и металлов является актуальной задачей водородного материаловедения и материаловедения тугоплавких сплавов.

В нашей Республике уделяется большое внимание развитию экспериментальных и теоретических работ в области твердого тела и материаловедения на мировом уровне. В этом плане получены определенные результаты, в частности, показана возможность получения наноструктурированного карбида титана с высокими показателями эксплуатационных свойств. Улучшение эффективности исследований в этом направлении через применение инновационных технологий теоретических и прикладных исследований в области материаловедения имеет большое значение и отражено в Стратегии<sup>1</sup> развития нового Узбекистана на 2022–

---

<sup>1</sup> Указ Президента Республики Узбекистан № УП-60 «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022–2026 гг.» от 28 января 2022 г.

2026 гг.

Исследования, проведенные в данной диссертационной работе, в определенной мере соответствуют задачам, обозначенным в Указах и Постановлениях Президента Республики Узбекистан № УП-60 «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022–2026 гг.» от 28 января 2022 года, № УП-3012 «О программе мер по дальнейшему развитию возобновляемой энергетики, повышению энергоэффективности в отраслях экономики и социальной сфере на 2017-2021 годы» от 26 мая 2017 года, № ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 г, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данном направлении.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Диссертационное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий в республике II. «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

**Степень изученности проблемы.** Исследования физических, механических свойств, а также кристаллической структуры карбида титана  $TiC_x$  проводились ведущими учеными мира, в том числе российскими (А.И.Гусев, А.А.Ремпель, В.Н.Липатников, С.З.Назарова, Л.В.Зуева, Р.А.Андриевский, И.И.Спивак), корейскими (С.Н.Lee, Н.С.Shim, Y.N.Choi, J.S.Lee, М.Р.Hwang) и другими. Ими проведены теоретические и экспериментальные исследования фазовых превращений в карбидах и нитридах переходных металлов IV-VI групп, изучены электро - и теплофизические, а также механические свойства.

Некоторые узбекистанские ученые (И.А.Каримов, В.Т.Эм, И.Хидиров, М.Каланов, М.Ю.Ташметов, А.Эмиралиев, Ф.Файзуллаев, И.С.Латергаус, Б.Б.Мирзаев, А.С.Парпиев) проводили нейтронографические исследования кристаллических структур и фазовых превращений в этих сплавах на нейтронном дифрактометре ДН-500, установленном на горизонтальном канале ядерного реактора ВВР-СМ ИЯФ АН РУз. Результаты этих исследований получили мировую известность. Ими впервые было показано влияние водорода на фазообразование и кристаллическую структуру карбидов и нитридов переходных металлов IV-VI групп, обнаружен ряд новых упорядоченных фаз, некоторые из них вошли в Международную базу данных по кристаллографии.

В последнее время российские ученые П.В.Бурков и С.Н.Кульков показали, что замена значительной части атомов титана (до 10 % ат. от.) на атомы молибдена существенно улучшает служебные характеристики стехиометрического карбида титана  $TiC$ . При этом образуется карбид с двумя подрешетками металла, механические свойства которого превосходят свойства сплавов, содержащих дефицитный и дорогостоящий вольфрам. Узбекистанские ученые М.Ю.Ташметов и М.Патиев изучали фазовые

превращения в многокомпонентных сплавах внедрения на основе нестехиометрических карбидов титана и ванадия и показали роль второго металла (Mo, V, Ta, Nb) и неметалла (O, N и H) в фазообразовании и влияние на степень дальнего порядка в этих сплавах.

Однако, несмотря на большое практическое значение карбида титана в технике, промышленности и медицине, не проведено систематическое исследование влияния водорода различного содержания в широком диапазоне на структурную стабильность карбида титана, хотя из-за технологической специфики получения карбида титана, он часто может содержать в неметаллической подрешетке водород различного содержания. Кроме того, этот вопрос имеет самостоятельный интерес, так как карбид титана, содержащий водород является одним из кандидатов для водородной энергетики как высокотемпературный резервуар водорода. В частности, пока не синтезирован сплав карбида титана TiC с заменой значительной части атомов титана на атомы молибдена больше 10 % ат. отношения и не исследовано влияние такой замены на свойства сплава.

**Связь темы диссертационного исследования с планами научно - исследовательских работ научно - исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационное исследование выполнено в рамках научно-исследовательских проектов Института ядерной физики АН РУз по темам: Ф2–ФА-Ф119 «Изучение закономерностей образования термо - и  $\gamma$  - радиационно - стимулированных кристаллических структур сплавов внедрения на основе Ti методом дифракции нейтронов» (2012-2016); ОТ-Ф2-22 «Развитие теории тепловых колебаний атомов в кристаллах» (2017-2020); утвержденной Постановлением Президента №ПП-4526 от 21 ноября 2019 года программы научно-исследовательских работ по теме: «Нейтроннографическое исследование кристаллической структуры и фазовых превращений в многокомпонентных сплавах внедрения с двойными подрешетками металлов или неметаллов на основе титана» (2020-2024).

**Целью диссертационной работы** является выявление закономерностей образования кристаллической структуры в сплавах внедрения с двойными подрешетками металлов (Ti, Mo) и неметаллов (C, H) на основе карбида титана TiC.

**Задачи исследования:**

провести нейтронографическое исследование влияния различного содержания атомов водорода на кристаллическую структуру нестехиометрического карбида титана TiC<sub>x</sub>;

провести нейтронографическое исследование структурных фазовых превращений в карбиде титана с различным содержанием водорода TiC<sub>x</sub>H<sub>y</sub> в интервале температур 1475-300 К;

синтезировать сплавы в системе Ti-Mo-C с заменой части атомов титана в карбиде титана TiC и найти условия получения данного сплава с большим содержанием молибдена;

провести структурные исследования сплавов внедрения Ti<sub>1-x</sub>Mo<sub>x</sub>C

методом нейтронографии;

определить элементарную ячейку, пространственную группу и параметры решетки сплава  $Ti_{1-x}Mo_xC$ ;

определить микротвердость сплавов  $Ti_{1-x}Mo_xC$  методом Виккерса;

изучить влияние замены части атомов металла (Ti) или части атомов неметалла (C) в карбиде титана TiC другими видами атомов на величину среднеквадратичного смещения атомов из идеального положения в трехкомпонентных сплавах  $Ti_{0.75}Mo_{0.25}C$ ,  $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ ,  $TiC_{0.50}N_{0.50}$  и  $TiC_{0.30}N_{0.70}$ .

**Объектом исследования** являются сплавы внедрения на основе карбида титана  $TiC_x$  с металлическими (Ti, Mo) и неметаллическими (C, N) подрешетками.

**Предметом исследования** являются кристаллическая структура и фазовые превращения в трехкомпонентных сплавах внедрения ( $TiC_xH_y$ ,  $Ti_{1-x}Mo_xC$ ) с двойными подрешетками на основе карбида титана  $TiC_x$ .

**Методы исследования:** метод дифракции нейтронов, рентгенография, нейтроноструктурный анализ методом полнопрофильного анализа (FullProf), метод измерения микротвердости по Виккерсу.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

показано, что высокотемпературный карбогидрид титана  $TiC_{0.50}H_{y>0.22}$  имеет упорядоченную структуру с пространственной группой (пр. гр.)  $Fd\bar{3}m$  и упорядоченные антифазные домены (АФД) с периодом  $P=16$ ;

обнаружен в системе Ti-C-H ряд последовательных ступенчатых (эволюционных) фазовых превращений, ход и фазовый состав которых зависят от концентрации водорода в ГЦК карбогидриде титана и от температуры;

обнаружен концентрационный фазовый переход I рода в карбогидриде титана  $TiC_{0.50}H_y$  при концентрациях водорода  $y>0.50$  с изменением сингонии и с резким скачком параметра решетки с гранцентрированной кубической структуры (пр. гр.  $Fm\bar{3}m$ ) в гексагональную плотноупакованную структуру (пр. гр.  $P\bar{3}m1$ ) при соотношении содержания неметаллов  $x=H/Ti \geq C/Ti = 0.50$ ;

обоснована и показана возможность замены части атомов титана в ГЦК карбиде титана на атомы Mo до 30 % ат. отношения и получения сверхтвердых сплавов внедрения на матрице твердого раствора замещения Ti и Mo методом высокотемпературного спекания (при 2475 K) в соответствующих пропорциях порошков карбидов титана и молибдена.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

определено полное среднеквадратичное смещение атомов в сплавах  $Ti_{0.75}Mo_{0.25}C$  и  $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$  по данным дифракции нейтронов методами наименьших квадратов и полнопрофильного анализа дифрактограмм, которое существенно (30 %) больше, чем в бинарном сплаве TiC;

установлено, что замена в кубическом карбиде титана TiC части атомов металла (Ti) или части атомов неметалла (C) одного сорта на другой, отличающийся внешней валентной электронной конфигурацией, приводит к

возникновению статических искажений в решетке трехкомпонентных сплавов  $Ti_{0.75}Mo_{0.25}C$ ,  $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ ,  $TiC_{0.50}N_{0.50}$  и  $TiC_{0.30}N_{0.70}$  и может быть способом изменения динамических характеристик кристаллической решетки; показано, что карбогидриды титана эквиатомного состава  $TiC_{0.50}N_{0.50}$  могут быть использованы как высокотемпературный резервуар водорода.

**Достоверность полученных результатов** обосновывается использованием метода дифракции нейтронов, у которого чувствительность тяжелого атома металла и легких атомов неметаллов (С и Н) в кристаллической решетке одного порядка; программой полнопрофильного анализа дифрактограмм “FullProf” для структурного анализа, рекомендованной Международным обществом Кристаллографов, согласием выводов с основными положениями теории фазовых превращений в твердых телах и теории тепловых колебаний решетки, не противоречием общепризнанным современным представлениям физики конденсированного состояния веществ.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость результатов заключается в том, что установленное распределение атомов водорода в карбогидридах титана  $TiC_xH_y$  и его влияние на структурные фазовые превращения являются ценной и новой информацией в области физики сплавов внедрения. Обоснование и экспериментальное подтверждение замены атомов титана на атомы молибдена до 30 % в карбиде титана  $TiC$  и таким путем улучшение его свойства в зависимости от числа валентных электронов компонентов обогащают теории фазообразования в сплавах внедрения. Результаты могут быть использованы для преподавания в ВУЗах по физике конденсированных сред.

Практическая значимость результатов исследования заключается в получении сплава  $Ti_{1-x}Mo_xC$ , который может заменить сплавы, содержащие в составе дефицитный вольфрам, являясь как ценным справочным материалом для технологов в области металлургии и водородном материаловедении.

**Внедрение результатов исследования.** Основные результаты по исследованию кристаллических структур и фазовых превращений в сплавах внедрения с двумя подрешетками металлов и неметаллов на основе карбида титана вошли в учебное пособие “Qattiq jism fizikasi” (I. Khidirov. – Ташкент: Мумтоз сўз, 2019. – 388 с.), рекомендованное для студентов ВУЗов, ВТУЗов и молодых научных сотрудников (Свидетельство выдано на основании приказа Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан № 531 от.14.06.2018). В частности:

информация о высокотемпературном карбогидриде титана  $TiC_{0.50}N_{y>0.22}$ , имеющим упорядоченную структуру с (пространственной группой  $Fd\bar{3}m$ ) и упорядоченные антифазные домены с периодом  $P=16$  используется в учебном процессе в рамках программы бакалавриата по курсу «Физика конденсированного состояния» и программы магистратуры по специальному курсу «Физика конденсированного состояния и материаловедение» (письма

Нукусского Государственного педагогического института №01-20-09/51 от 11.01. 2022 г., Ферганского Государственного университета № 01-117 от 15.01.2022 г.). Использование результатов позволило расширить представления студентов о современных проблемах физики конденсированного состояния;

информация по обнаружению в системе Ti-C-N ряда последовательных ступенчатых (эволюционных) фазовых превращений и концентрационного фазового перехода I рода используется в учебном процессе в рамках программы бакалавриата по курсу «Физика конденсированного состояния» и программы магистратуры по специальному курсу «Физика конденсированного состояния и материаловедение» (письма Нукусского Государственного педагогического института №01-20-09/51 от 11.01.2022 г., Ферганского Государственного университета № 01-117 от 15.01.2022 г.). Использование результатов позволило расширить представления студентов о фазовых превращениях в твердых телах;

результаты по возможной замене части атомов титана в ГЦК карбиде титана на атомы Мо и получению сверхтвердых сплавов внедрения на матрице твердого раствора замещения методом спекания используются в учебном процессе в рамках программы бакалавриата по курсу «Физика конденсированного состояния» и программы магистратуры по специальному курсу «Физика конденсированного состояния и материаловедение» (Письма Нукусского Государственного педагогического института им. Ажинияза. № 01-20-09/51 от 11.01.2022 и Ферганского Государственного университета № 01-117 от 15.01.2022). Использование результатов позволило ознакомить студентов с новыми свойствами конденсированных сред и расширить представления студентов о фазовых превращениях в твердых телах.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 6 международных и республиканских научно-практических конференциях.

**Опубликованность результатов.** По теме диссертации опубликованы 13 научных работ, из них 7 статей в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, из которых 3 в зарубежных научных журналах.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 98 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, отражены цели и задачи, указаны объект, предмет и методы исследования, соответствие исследований приоритетным направлениям развития науки и технологий в Республике Узбекистан, раскрыта научная новизна и практическая значимость результатов работы, обоснована

достоверность полученных результатов, приведены сведения об апробации работы и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Кристаллическая структура и фазовые превращения в сплавах внедрения с двойными подрешетками металлов и неметаллов на основе карбида титана»** приводится обзор литературных данных о кристаллической структуре и фазовых превращениях сплавов внедрения с двойными подрешетками неметаллов  $TiC_xH_y$  и металлов  $Ti_{1-x}Mo_xC$ . На основе анализа литературных данных сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава диссертации **«Методики экспериментов и расчетов»** посвящена выбору методов нейтронографического исследования и нейтроноструктурного анализа. Описаны условия съемки нейтронограмм и рентгенограмм. Приведены сведения о приготовлении и аттестации исследуемых образцов.

Карбогидриды титана  $TiC_{0.50}H_y$  с различным содержанием водорода  $y=0.310.64$  синтезировали экзотермической реакцией методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза ( $T_{экз.} \approx 2775-3270$  К) путем сжигания спрессованных порошков титана марки ПТЭМ с чистотой 99,76 масс. % и углерода «особо чистого» в бомбе постоянного давления под различным давлением в водородной среде в ИСМАН РАН.

Образцы  $Ti_{1-x}Mo_xC$  получали методом порошковой металлургии (спекания) перемешанных порошков кубических карбидов  $TiC$  и  $MoC$  в соответствующих пропорциях. Порошки тщательно перемешивались в агатовой ступке в течение не менее 4 ч. После тщательного перемешивания был приготовлен цилиндрический брикет под давлением  $3 \times 10^6$  Н/м<sup>2</sup>, отжигали в графитовом сосуде при 2475 К в течение 8 часов в высокотемпературной вакуумной печи типа СШВ-1,2,5/25 И1, затем охлаждали вместе с печью.

Термообработку водородосодержащих образцов проводили в кварцевой ампуле в печи типа SNOL ( $\Delta T = \pm 3$  °С). Кварцевая ампула была запаяна под вакуумом, что предотвращает выход водорода из образца.

Химический состав синтезированных образцов определяли методом химического анализа, а также минимизацией факторов расходимости экспериментальных и расчетных интенсивностей дифракционных отражений на нейтронограмме образца. Погрешность химического анализа составляет 0.3%. Нейтронограммы образцов снимали при комнатной температуре на нейтронном дифрактометре DN-500, смонтированном на горизонтальном канале ядерного реактора ВВР-СМ ИЯФ АН РУ ( $\lambda=1.085$  Å).

Микротвердость определяли методом Виккерса на твердомере HVS-1000 с цифровым дисплеем. Точность измерения размеров опечаток составляет  $\pm 0.2$  мкм.

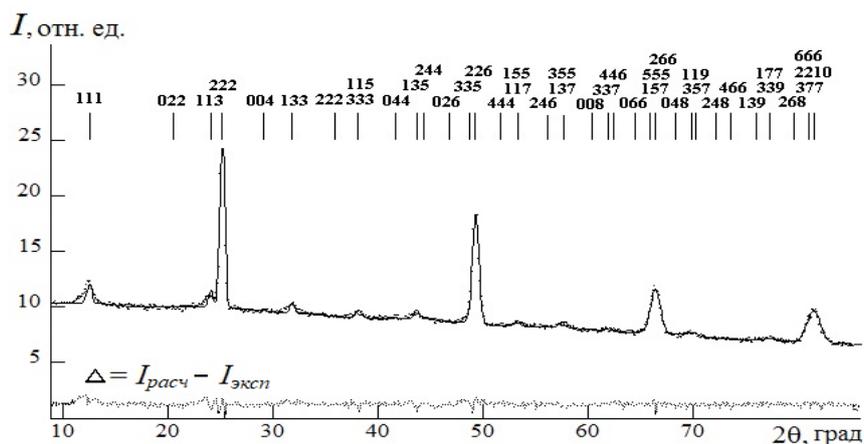
Третья глава диссертации **«Кристаллическая структура и фазовые превращения в фазах внедрения с двойными подрешетками неметаллов на основе карбида титана  $TiC_xH_y$ »** посвящена изучению кристаллической

структуры и фазовых превращений в сплавах внедрения на основе карбида титана  $TiC_xH_y$  с различным содержанием водорода.

Для водородной энергетики представляет интерес вопрос о наибольшем содержании водорода в порошковых сильно нестехиометрических сплавах внедрения с точки зрения высокотемпературного водородного резервуара. Все исследования кристаллической структуры ГЦК карбогидрида титана  $TiC_xH_y$ , проведенные до настоящего времени, выполнены в образцах с низким содержанием водорода  $y \leq 0.21$ , в связи с чем возникают трудности в достоверности определения расположения атомов водорода в каких-либо междоузлиях из-за маленького значения амплитуды когерентного рассеяния нейтронов на ядрах водорода ( $b_H = -0.374 \times 10^{-4} \text{ \AA}$ ;  $b_{Ti} = -0.34 \times 10^{-4} \text{ \AA}$ ). Поэтому появилась необходимость изучения рассматриваемого вопроса в карбогидридах титана  $TiC_{0.50}H_{0.50}$  с большим содержанием водорода после закалки от 1475 К. Согласно нейтроноструктурному анализу закаленный образец  $TiC_{0.50}H_{0.50}$  однофазный ( $a = 4.315 \pm 0.002 \text{ нм}$ ) индицируется в рамках пр. гр.  $Fm\bar{3}m$ , в которой все атомы водорода находятся в тетраэдрических междоузлиях. При этом фактор недостоверности определения структуры был наименьшим:  $R_{бр.} = 5\%$ . Если предположить, что атомы водорода расположены в октаэдрических междоузлиях, то наблюдается плохое согласие экспериментальных и расчетных интенсивностей рефлексов и  $R_{бр.} = 12\%$ . Следовательно, в высокотемпературном карбогидриде титана  $TiC_{0.50}H_{0.50}$  атомы водорода расположены в тетраэдрических междоузлиях. Как водородный резервуар сплав  $TiC_{0.50}H_{0.50}$  обезводородоживается полностью при температуре 670-725 К за 5 ч в непрерывно откачиваемом не большом вакууме ( $p \approx 10^{-3} \text{ Па}$ ), сохраняя при этом свою структуру. Обезводороженный сплав опять можно гидридовать до состава  $TiC_{0.50}H_{0.50}$ .

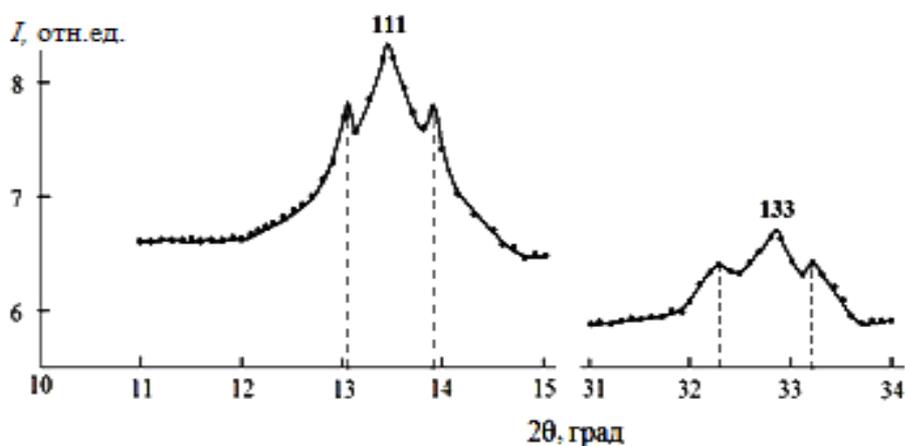
Как правило, карбогидриды состава  $TiC_{0.50}H_{y \leq 0.22}$ , синтезированные методом СВС имеют неупорядоченную ГЦК структуру (пр. гр.  $Fm\bar{3}m$ ), а карбогидриды титана с более большим содержанием водорода, ( $TiC_{0.50}H_{0.31}$ ) имеет упорядоченную кристаллическую структуру (пр. гр.  $Fd\bar{3}m$ ) и упорядоченную антифазную доменную (АФД) структуру. Нейтронограммы  $TiC_{0.50}H_{0.31}$  и  $TiC_{0.50}H_{0.50}$  (рис.1.), полученные после СВС-синтеза, имеют ряд сверхструктурных отражений в отличие от нейтронограммы образца с низкой концентрацией водорода  $TiC_{0.50}H_{y \leq 0.22}$ , полученного в аналогичных условиях методом СВС. Наличие сверхструктурных рефлексов на нейтронограмме указывает на дальний порядок атомов внедрения. Нейтронная дифракция этой фазы характеризуется упорядоченным расположением межузельных атомов внедрения в междоузлиях решетки ГЦК-ячейки с  $a = 8.643(2) \text{ \AA} \approx 2a_0$ ,  $a_0$  - постоянная неупорядоченной решетки. Согласно нейтронограмме (рис.1.) кристаллическая структура упорядоченной фазы  $TiC_{0.50}H_{0.31}$  описывается в рамках пр. гр.  $Fd\bar{3}m$  также, как структура карбогидрида титана состава  $TiC_{0.50}H_{0.22}$ , упорядоченная после низкотемпературного отжига при температуре 870-775 К. Согласно модели, представленной в данной работе, атомы углерода занимают, в основном, октаэдрические междоузлия  $16c$ , а

оставшееся небольшое количество атомов углерода и атомов водорода занимают другой тип междоузлия  $16d$  в рамках пр. гр.  $Fd\bar{3}m$ . Однако в рамках этой модели не удалось получить приемлемый фактор достоверности методом нейтроноструктурного анализа. Плохое соответствие экспериментальных и расчетных интенсивностей сверхструктурных дифракционных отражений в представленной модели поясняется формированием упорядоченных АФД в исследуемом образце. Действительно, как видно из рисунков 1 и 2, на нейтронограмме наблюдается расщепление (искажение) сверхструктурных отражений (отражений с нечетными индексами Миллера), и их профили отличаются от расчетных.



**Рис. 1. Нейтронограмма исходного карбогидрида титана  $TiC_{0.50}H_{0.31}$  после получения методом СВС (пр. гр.  $Fd\bar{3}m$ )**

Расщепление сверхструктурных отражений свидетельствует о том, что в образце образуется периодическая упорядоченная АФД-структура. Искажение формы сверхструктурных отражений в отличие от структурных вызвано различными системами атомных плоскостей, соответствующих разным АФД. Отметим, что для упорядочения АФД в  $TiC_{0.50}H_y$  с концентрацией водорода  $H/Ti \leq 0.22$  требуется длительный отжиг при температуре  $T \leq 870$  К.



**Рис. 2. Сверхструктурные отражения 111 и 133 на нейтронограмме карбогидрида титана  $TiC_{0.50}H_{0.31}$**

По расстоянию между сателлитами максимумами с индексами 133 определяли  $P$  для упорядоченной структуры АФД по следующей формуле:

$$P = \lambda^2/a_0^2(\sin^2 \theta_2 - \sin^2 \theta_1). \quad (1)$$

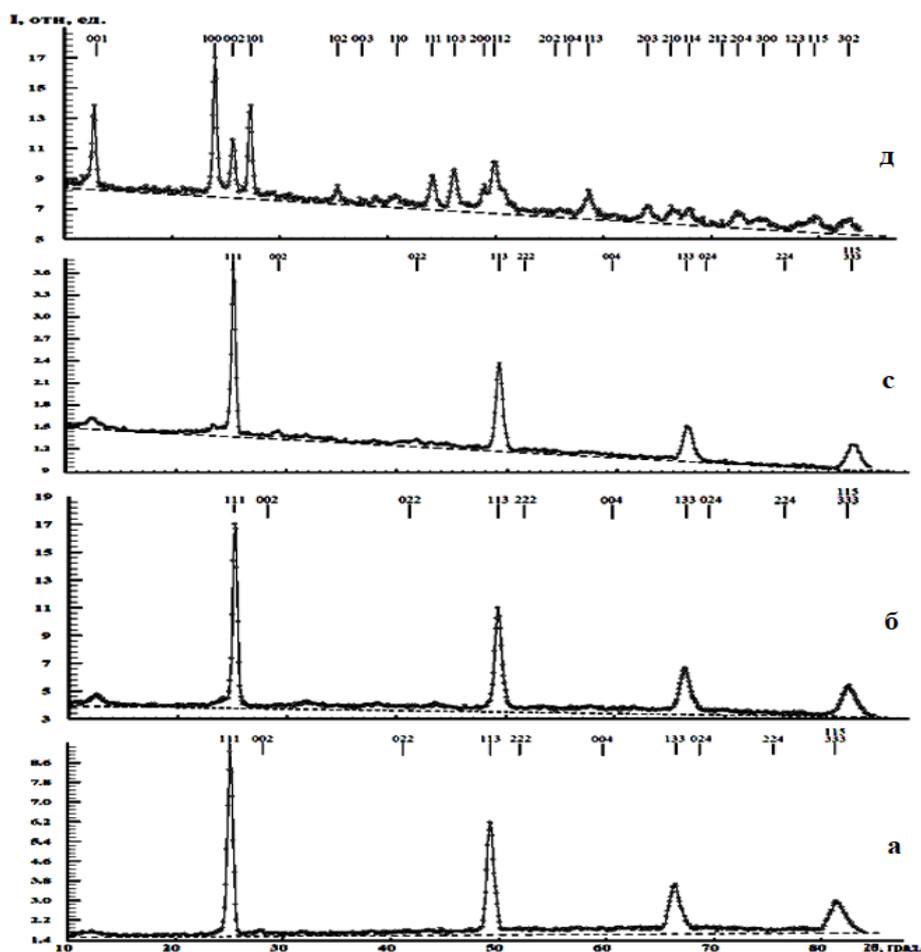
где  $\lambda$  – длина волны нейтронов,  $a_0$  – параметр решетки, установленный рентгенографически в рамках пр. гр.  $Fm\bar{3}m$ ;  $\theta_2$  и  $\theta_1$  – углы Брэгга сателлитов, возникающих вследствие удлинения периода АФД-структуры. Период  $P$  структуры АФД оказался равным 16, что больше периода упорядоченных АФД в карбогибридах титана с концентрацией  $H/Ti \leq 0.22$  ( $P_{cp} = 11$ ). Как правило, карбогидриды состава  $TiC_{0.50}H_{y \leq 0.22}$ , синтезированные методом СВС имеют неупорядоченную ГЦК структуру (пр. гр.  $Fm\bar{3}m$ ), а карбогидриды титана с большим содержанием водорода, ( $TiC_{0.50}H_{0.31}$ ) имеет упорядоченную кристаллическую структуру (пр. гр.  $Fm\bar{3}m$ ) и упорядоченную АФД-структуру. По-видимому, это связано с высокой температурой перехода типа порядок-беспорядок в карбогидриде титана состава  $TiC_{0.50}H_{0.31}$  по сравнению с карбогидридом титана с низким содержанием водорода  $TiC_{0.50}H_{0.22}$ .

С целью получения кубического карбогидрида титана с большим содержанием водорода, чем в эквИАтомном составе  $TiC_{0.50}H_{0.50}$ , синтезировали карбогидриды  $TiC_{0.50}H_{0.55}$  и  $TiC_{0.50}H_{0.60}$ . Согласно рентгенофазовому и нейтронографическому анализам, кристаллические структуры синтезированных образцов оказались гексагональными, описываемыми в рамках пространственной группы  $P\bar{3}m1$ . На рис. 3д представлена нейтронограмма образца  $TiC_{0.50}H_{0.55}$ , на которой наблюдается некогерентный фон, обусловленный рассеянием нейтронов ядрами водорода в решетке, интенсивность которого уменьшается с увеличением угла Брэгга. Некогерентный фон тем сильнее, чем больше водорода в образце. В рамках предполагаемой модели атомы элементарной ячейки  $Ti$  занимают позиции:  $2(d)$  с координатами  $1/3, 2/3, \bar{z}_m = 0.234 \pm 0.002$ ;  $2/3, 1/3, \bar{z}_m = 0.766 \pm 0.002$ ; 1 атом углерода  $C$  занимает октаэдрическую позицию  $1(a)$  с координатами  $0,0,0$ ; атомы водорода  $H$  занимают тетраэдрические позиции  $2(d)$  с координатами  $1/3, 2/3, z_1 = 0.632 \pm 0.002$ ;  $2/3, 1/3, \bar{z}_1 = 0.368 \pm 0.002$ . Структурная формула этой гексагонально плотноупакованной (ГПУ) фазы имеет следующий вид:  $Ti_2CH_{2-x}$  (где  $x=0.98 - 0.90$ ).

Отжиг полученных фаз в вакуумированной кварцевой ампуле при температурах 1700-300 К с шагом 100 К по 24 ч при каждой температуре не привел к изменению кристаллической структуры данной фазы. Следовательно, ее кристаллическая структура в закрытом объеме, предотвращающем выход водорода, стабильна. Естественно представляет интерес изучение ее термостабильности в вакууме. Для этого данную ГПУ фазу отжигали в непрерывно откачиваемом вакууме не хуже  $5.3 \times 10^{-3}$  Па. Вакуумную термообработку твердых растворов начинали с комнатной температуры с шагом 300 К при каждой температуре, сначала в течение 24 ч,

а затем в течение 48 ч. Количество водорода в образцах после вакуумного отжига приводило к уменьшению некогерентного фона на нейтронограмме из-за уменьшения содержания атомов водорода в образце.

Согласно нейтроноструктурному анализу в изучаемых твердых растворах до температуры 525 К термоэмиссия Н практически не обнаруживается. Начиная с температуры 550 К обнаруживается выделение чистого  $\alpha$ -Ti и ГЦК карбогидрида  $TiC_xH_y$ . При дальнейшем повышении температуры количество выделившихся фаз увеличивается. Следовательно, сплавы с высоким содержанием (углерода и водорода)  $Ti_2CH_{2-x}$  в вакууме термоустойчивы лишь при температурах  $T < 550$  К и использовать их в качестве водородного резервуара нельзя.



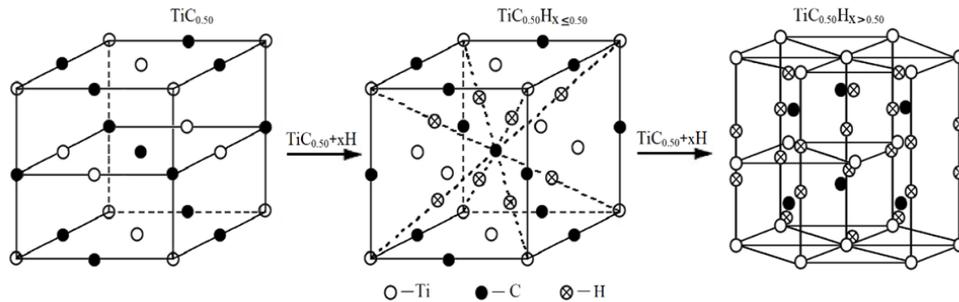
**Рис. 3.** Нейтронограммы  $TiC_{0.50}$  (a),  $TiC_{0.50}H_{0.21}$  (b),  $TiC_{0.50}H_{0.50}$  (c),  $TiC_{0.50}H_{0.55}$  (д). Над рефлексами проставлены индексы Миллера, соответствующие пространственным группам  $Fm\bar{3}m$  (a, б и с) и  $P\bar{3}m1$  (д)

Однако их можно использовать как замедлитель нейтронов в ядерно энергетических транспортных установках, так как в этом сплаве больше атомов замедлителей Н и С и большая термостабильность, чем у дигидрида титана  $TiH_2$  (475 К), используемого для этой цели. Наблюдаемый фазовый переход в  $TiC_{0.50}H_y$  является фазовым переходом I рода, поскольку происходит резким (скачком) изменением симметрии (параметра решетки).

Кроме того, термостабильность ГПУ  $Ti_2CH_{2-x}$  фазы позволяет сделать вывод, что в отличие от ГЦК сплава внедрения  $TiC_xH_y$  фазы ГПУ фаза  $Ti_2CH_{2-x}$  является химическим соединением. Таким образом, обнаружен новый тип концентрационного фазового перехода «сплав внедрения» (ГЦК) → «химическое соединение» (ГПУ).

На рис. 4 представлены элементарные ячейки  $TiC_{0.50}$ ,  $TiC_{0.50}H_{x \leq 0.50}$  и химического соединения  $TiC_{0.50}H_{x > 0.50}$  ( $Ti_2CH_{2-x}$ ).

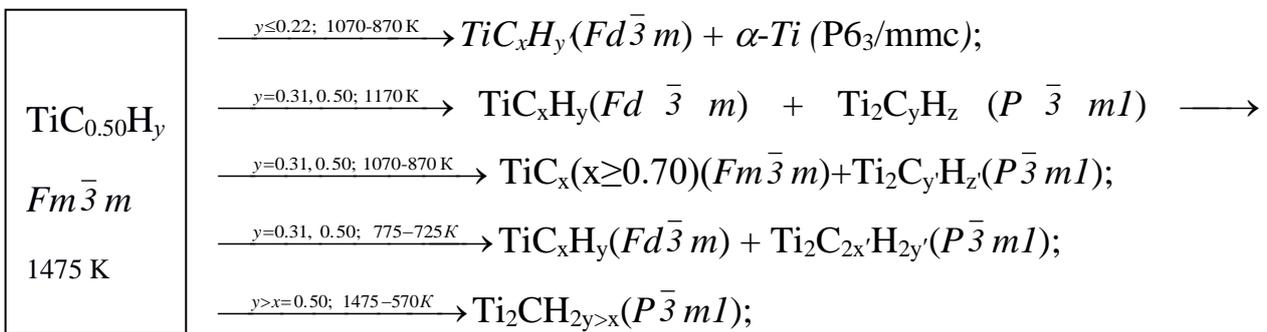
Поскольку большинство карбогидридов были получены методом СВС, представляет интерес получение фазового состава после равновесного ступенчатого отжига при температурах  $1270\text{ K} \rightarrow 1170\text{ K} \rightarrow 1070\text{ K} \rightarrow 970\text{ K} \rightarrow 870\text{ K}$  по 24 ч с шагом 100 К в вакуумированной кварцевой ампуле.



**Рис. 4. Элементарные ячейки сплавов внедрения  $TiC_{0.50}$ ,  $TiC_{0.50}H_{x \leq 0.50}$  и химического соединения  $TiC_{0.50}H_{x > 0.50}$  ( $Ti_2CH_{2-x}$ )**

Результаты фазового анализа после такого отжига обобщены на рис.5. Из результатов проведенных исследований вытекает, что внедренный водород в решетку ГЦК-фазы карбида титана на нижней границе области гомогенности  $TiC_x$  при равновесном состоянии (при низких температурах  $T \leq 1170\text{ K}$ ) приводит к распаду на несколько фаз и уменьшению ее области гомогенности.

При этом в зависимости от температуры и при некоторой концентрации водорода наблюдается эволюция фазовых переходов.



**Рис. 5. Схема распада или эволюции фазовых превращений в карбогидриде титана  $TiC_{0.50}H_y$  в зависимости от концентрации водорода у и температуры**

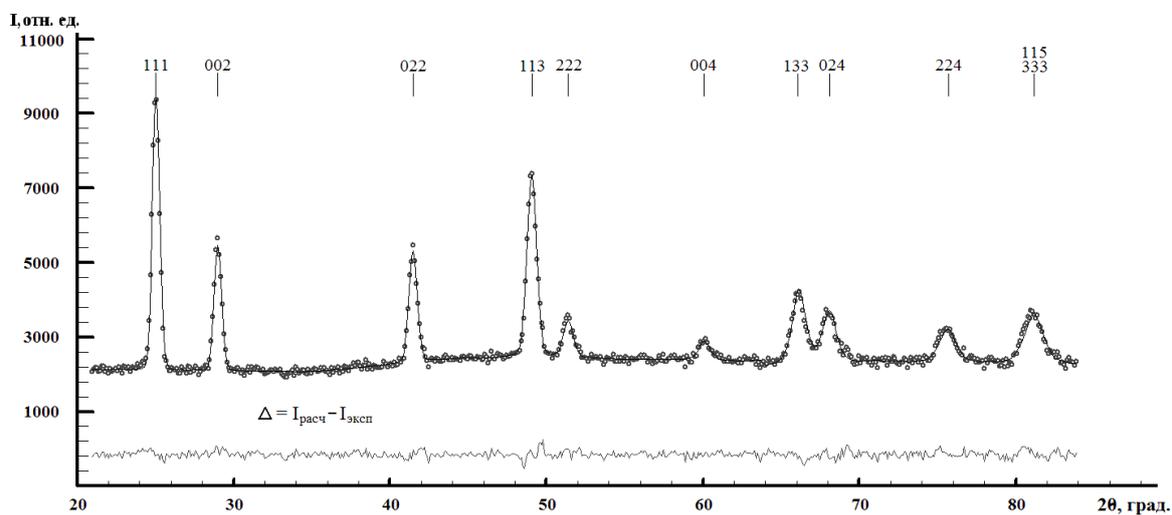
В четвертой главе диссертации «Кристаллическая структура и свойства сплава  $Ti_{1-x}Mo_xC$ » приводятся результаты нейтронографических

**исследований сплавов  $Ti_{1-x}Mo_xC$ .** В последнее время в связи с острым дефицитом вольфрама возникла необходимость нахождения сплавов, замещающих вольфрам, или вольфрамсодержащие сплавы. Одними из таких сплавов могут быть сплавы системы Ti-Mo-C. До настоящего времени был получен однофазный кубический сплав данной системы до состава  $Ti_{0.90}Mo_{0.10}C$ . Проведенный нами анализ показал, что можно получить данный сплав с большим содержанием способом порошковой металлургии, варьируя содержание исходных материалов и при высокой температуре спекания.

Карбид титана TiC и ГЦК карбид молибдена MoC изоструктурные, имеют гранцентрированную кубическую решетку типа NaCl, близкие значения параметров решетки ( $a = 4.3278 \text{ \AA}$  для TiC и  $a = 4.3210 \text{ \AA}$  для MoC). Атомные радиусы Ti и Mo близки ( $1.47 \text{ \AA}$  и  $1.40 \text{ \AA}$  для Ti и Mo, соответственно), что выполняется условие Вегарда образования непрерывного твердого раствора замещения.

По данным анализа нейтронограммы полученный образец  $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$  однороден с однофазной структурой типа NaCl (пр. гр.  $Fm\bar{3}m$ ). Нейтронограмма образца индицируется в рамках пр. гр.  $Fm\bar{3}m$ . На рис. 6 представлены экспериментально наблюдаемая и рассчитанная по предложенной нами структурной модели нейтронограммы полученного сплава.

В этой модели 2.8-части позиций  $4b$  заполнена атомами Ti, а оставшаяся 1.2-часть заполнена Mo, и они статистически взаимозамещены, а 4 атома углерода статистически расположены в октаэдрических междоузлиях, позиции  $4a$ .



**Рис. 6. Нейтронограммы сплава  $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ : точка - эксперимент, сплошная линия - расчет в пр. гр.  $Fm\bar{3}m$ ,  $\Delta$  – разница между экспериментальным и расчетным значениями интенсивности дифракционной картины. Индексы Миллера  $hkl$  отражающих плоскостей расположены над дифракционными пиками в пр. гр.  $Fm\bar{3}m$**

Для поликристаллического образца цилиндрической формы экспериментально наблюдаемая интенсивность нейтронодифракционного

отражения для кубической структуры, как вытекает из выражения структурного фактора, приведенного для пр. гр.  $Fm\bar{3}m$  в, в конечном итоге определяется следующим выражением:

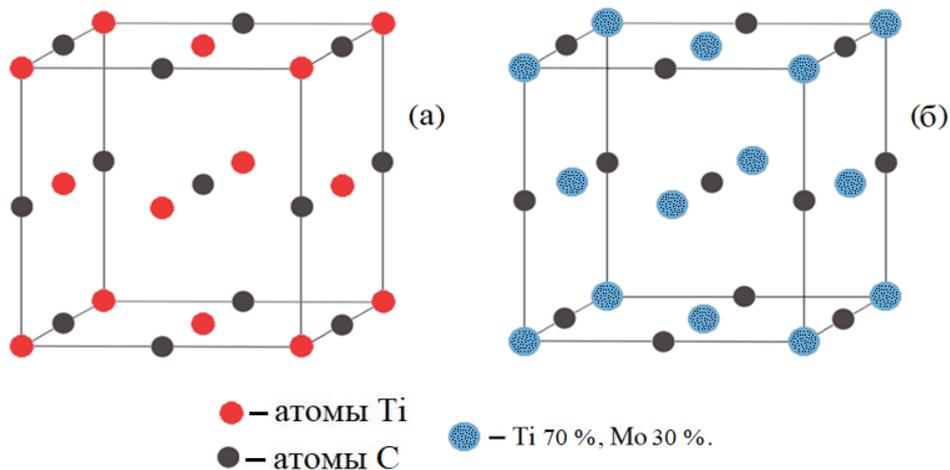
$$I_{\text{экс}} = kI_0 \exp\left(-\frac{16\pi^2 \overline{u_\Sigma^2} \sin^2 \theta}{3 \lambda^2}\right) \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от геометрии прибора и образца;  $\overline{u_\Sigma^2} = \frac{\overline{u_{\text{Ti}}^2} + \overline{u_{\text{Mo}}^2} + \overline{u_{\text{C}}^2}}{3}$  – усредненное среднеквадратичное смещение атомного комплекса (в дальнейшем атома), причем каждый  $\overline{u_i^2}$  состоит из среднеквадратичной амплитуды тепловых колебаний атомов и статических искажений решетки:  $\overline{u_i^2} = \overline{u_{\text{дин.}}^2} + \overline{u_{\text{ст.}}^2}$ . Согласно выражению (2), график зависимости  $\ln(I_{\text{экс}}/I_{\text{расч.}})$  от  $\sin^2 \theta / \lambda^2$  является прямой линией, по наклону которой можно определить тепловой фактор  $B$ :

$$B = (8\pi^2 \overline{u^2} / 3) \quad (3)$$

Далее по формуле (3) определяем среднеквадратичное смещение  $\overline{u^2}$ .

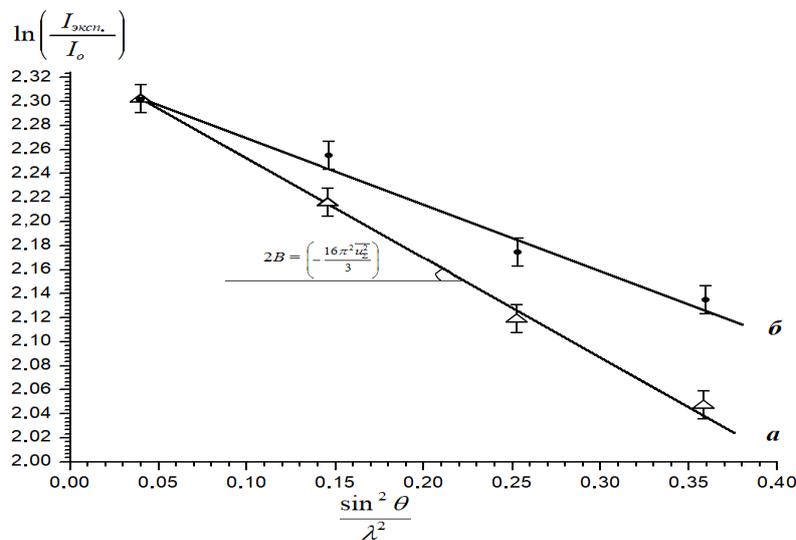
На рис. 7. представлены элементарные ячейки твердых растворов ГЦК TiC и Ti<sub>0.70</sub>Mo<sub>0.30</sub>C. Одним из фундаментальных свойств твердого тела является среднеквадратичное смещение (СКС) его атомов из-за тепловых колебаний. Нейтронограммы Ti<sub>0.70</sub>Mo<sub>0.30</sub>C и Ti<sub>0.75</sub>Mo<sub>0.25</sub>C с сильными интенсивностями дифракционных максимумов позволяют определить среднеквадратичное смещение атомов в данных сплавах с большой надежностью методом дифракции нейтронов.



**Рис. 7. Элементарные ячейки сплавов TiC (а) и Ti<sub>0.70</sub>Mo<sub>0.30</sub>C(б)**

Зависимость  $\ln(I_{\text{экс}}/I_{\text{расч.}})$  от  $\sin^2 \theta / \lambda^2$  приведена на рис. 8. Наклон прямой линии  $\ln(I_{\text{экс}}/I_{\text{расч.}})$  в функции  $\sin^2 \theta / \lambda^2$  определили методом наименьших квадратов. В табл. 1 приведено полученное значение для  $\overline{u_\Sigma^2}$  данного сплава.

Для теплового фактора  $B$  в сплаве  $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$  методом полнопрофильного анализа получено значение  $B = 0.32 \pm 0.03 \text{ \AA}^2$  (табл. 1.), из которого согласно формуле (3) вытекает, что для данного сплава  $\sqrt{u_{\Sigma}^2} = 0.110 \pm 0.001 \text{ \AA}$ . Оно практически точно совпадает со значением  $\sqrt{u_{\Sigma}^2}$ , нами полученным методом наименьших квадратов. В табл. 1 приведены значения среднеквадратичных смещений атома в ряде изоструктурных родственных сплавов со сплавом  $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ . Как видно  $\sqrt{u_{\Sigma}^2}$  атомов в сплаве  $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$  не сильно отличается от  $\sqrt{u_{\Sigma}^2}$  атомов стехиометрических карбонитридов титана  $TiC_{0.50}N_{0.50}$  и  $TiC_{0.30}N_{0.70}$ . Разница между этими величинами не более 5 %, то есть лежит в пределах ошибок определения этих величин.



**Рис. 8. Зависимость  $\ln\left(\frac{I_{\text{эксп}}}{I_0}\right)$  от  $\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2}$  для сплава а)  $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$  и б)  $Ti_{0.75}Mo_{0.25}C$ . Над точками указаны индексы Миллера отражающих плоскостей  $hkl$  в рамках пр. гр.  $Fm\bar{3}m$ , (а)**

**Таблица 1**

**Среднеквадратичное смещение атомов в решетке, микротвердость и параметры решетки ряда кубических тугоплавких сплавов**

№	Образец	$\sqrt{u_{\Sigma}^2}, \text{ \AA}$	Параметр решетки $a, \text{ \AA}$	Hv, ГПа
1	$Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$	$0.110 \pm 0.003$	$4.338 \pm 0.001$	$38 \pm 1.7$
2	$Ti_{0.75}Mo_{0.25}C$	$0.101 \pm 0.003$	$4.330 \pm 0.001$	$33.3 \pm 1.5$
3	$TiC_{0.96}$	$0.084 \pm 0.003$	$4.326 \pm 0.001$	$31.7 \pm 1.7$
4	$TiN_{0.97}$	$0.089 \pm 0.002$	$4.226 \pm 0.003$	20.5
5	$TiC_{0.50}N_{0.50}$	$0.105 \pm 0.001$	$4.302 \pm 0.002$	
6	$TiC_{0.30}N_{0.70}$	$0.105 \pm 0.001$	$4.302 \pm 0.002$	
7	WC	$0.058 \pm 0.003$	$4.215 \pm 0.001$	17.2

В то же время разница этих величин по сравнению со среднеквадратичным смещением  $\text{TiC}_{0.97}$  и  $\text{TiN}_{0.97}$  больше на 31 и 24 %, соответственно. Увеличение усредненного полного СКС не может быть объяснено увеличением амплитуды тепловых колебаний  $\overline{u_{\text{дин}}^2}$ , так как она, как правило, обратно пропорциональна массе элемента, а в данном случае значительная часть относительно с легкой массой атомов Ti заменена тяжелыми атомами Mo.

Мы также определили микротвердость сплава  $\text{Ti}_{0.70}\text{Mo}_{0.30}\text{C}$ . Образец цилиндрической формы был размером  $15 \times 10 \text{ мм}^2$ . Размер опечаток замеряли 20 раз и каждый раз определяли микротвердость, далее получили среднее значение. После введения поправок на пористость микротвердость сплава  $\text{Ti}_{0.70}\text{Mo}_{0.30}\text{C}$  составляла  $H = 38 \pm 1.4 \text{ ГПа}$ , а для состава  $\text{Ti}_{0.75}\text{Mo}_{0.25}\text{C}$   $H = 33 \pm 1.4 \text{ ГПа}$ . Для сравнения отметим, что микротвердость чистого карбида титана TiC составляет  $H = 32 \pm 1.7 \text{ ГПа}$ , а для карбида вольфрама WC  $H = 17 \pm 1.7 \text{ ГПа}$ . По-видимому, возникающие большие статические искажения в сплаве  $\text{Ti}_{0.70}\text{Mo}_{0.30}\text{C}$  по сравнению с TiC приводят к повышению микротвердости.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам на тему «Кристаллическая структура и фазовые превращения сплавов с двойными подрешетками металлов и неметаллов на основе карбида титана» можно сделать следующие выводы:

1. На примере кубического карбогидрида титана эквиатомного состава  $TiC_{0.50}H_{0.50}$ , содержащего в большом количестве водород, показано, что в высокотемпературном состоянии карбогидрида титана атомы водорода статистически расположены в тетраэдрических междоузлиях.

2. Показано, что кристаллическая структура высокотемпературного карбогидрида титана состава  $TiC_{0.50}H_{0.31}$ , синтезированного методом СВС, отличается от неупорядоченной структуры (пр. гр.  $Fm\bar{3}m$ ) высокотемпературного карбогидрида титана состава  $TiC_{0.50}H_{y \leq 0.22}$ , полученного в одинаковых условиях тем же методом. Карбогидрид титана  $TiC_{0.50}H_{0.31}$  имеет упорядоченную структуру, описываемую в рамках пр. гр.  $Fd\bar{3}m$  и имеет упорядоченные антифазные домены с периодом  $P = 16$ . Обнаруженное отличие объясняется тем, что карбогидрид титана с более высоким содержанием водорода характеризуется более высокой температурой упорядочения.

3. Установлено, что ГЦК-фаза высокотемпературного карбогидрида титана  $TiC_{0.50}H_y$  является метастабильной, которая в равновесном состоянии при низких температурах ( $T \leq 1170$  К) распадается на несколько фаз с сужением области гомогенности ГЦК фазы карбида  $TiC_{0.50}$ . Фазовый состав распавшегося сплава зависит от содержания водорода и температуры.

Обнаружено, что изменение фазового состава высокотемпературного карбогидрида титана  $TiC_{0.50}H_y$  с содержанием  $y = 0.31-0.50$  до равновесного состояния при понижении температуры имеет ступенчатый характер, сопровождающийся рядом фазовых превращений (эволюцией превращений).

4. Впервые в карбогидриде титана  $TiC_{0.50}H_y$  при содержании водорода  $y > 0.50$  обнаружен концентрационный фазовый переход I рода ГЦК  $\rightarrow$  ГПУ с резким уменьшением объема на 40 % без изменения октаэдрического окружения атомов углерода и тетраэдрического окружения атомов водорода.

5. Показана возможность замены атомов титана в карбиде титана  $TiC$  до 30 % ат. на атомы Мо и получения сплава  $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$  из хорошо перемешанных механических мелких порошков соответствующих карбидов методом высокотемпературного спекания. Кристаллическая структура этого сплава описывается в рамках пр. гр.  $Fm\bar{3}m$ , где атомы титана и молибдена взаимозамещены и занимают статистически 4 b позиции, а атомы углерода занимают статистически 4 a октаэдрические позиции. Замена большей части атомов титана на атомы молибдена в карбиде титана  $TiC$  до 30 % не приводит к изменению его кристаллической структуры. Это обстоятельство позволит получить новый сплав на основе  $TiC$  с новыми свойствами.

6. Определено усредненное полное среднеквадратичное смещение атомов в сплаве  $Ti_{1-x}Mo_xC$  по данным дифракции нейтронов методами наименьших квадратов и полнопрофильного анализа дифрактограмм.

Показано, что замена в карбиде титана  $TiC$  части атомов металла ( $Ti$ ) или части атомов неметалла ( $C$ ) одного сорта на атомы другого сорта, отличающегося внешней валентной электронной конфигурацией приводит к возникновению статических искажений в решетке трехкомпонентных сплавов  $Ti_{0.75}Mo_{0.25}C$  и  $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ ,  $TiC_{0.50}N_{0.50}$  и  $TiC_{0.30}N_{0.70}$ .

7. Установлено, что микротвердость полученного сплава  $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$  на 19 % больше по сравнению с микротвердостью двухкомпонентного сплава карбида титана  $TiC$ . Сделан вывод о том, что статические искажения в решетке трехкомпонентного сплава приводят к увеличению его микротвердости. Следовательно, замена части атомов  $Ti$  на атомы  $Mo$ , а также замена части атомов  $C$  на атомы  $N$  в решетке карбида титана  $TiC$  может быть способом изменения динамических характеристик его кристаллической решетки.

8. Резюмируя результаты исследования можно утверждать, что кубический карбид титана  $TiC$  может содержать в своей неметаллической подрешетке второй неметалл - атомы водорода различного содержания. Это приводит к структурной нестабильности и стимулирует различные фазовые превращения в зависимости от содержания водорода и температуры, что приводит к негодности практического использования карбида титана в технике. Однако при некоторых содержаниях водорода ( $TiC_{0.50}H_{y \leq 0.50}$ ) может быть использован в водородной энергетике и водородном материаловедении как высокотемпературный резервуар водорода. Замена части атомов  $Ti$  в металлической подрешетке ГЦК  $TiC$  на атомы  $Mo$  не приводит к структурной нестабильности, а приводит к существенному повышению микротвердости на 20 %.

**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**

**RAKHMANOV SAYFIDDIN DZHURABOEVICH**

**CRYSTAL STRUCTURE AND PHASE TRANSFORMATIONS OF  
ALLOYS WITH DOUBLE SUBLATTICES OF METALS AND  
NONMETALS BASED ON TITANIUM CARBIDE**

**01.04.07 – Condensed matter physics**

**DISSERTATION ABSTRACT**  
**of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences**

**Tashkent – 2022**

**The dissertation theme of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2021.4.PhD/FM249.**

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

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

**Scientific supervisor:** **Khidirov Irisali**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Official opponents:** **Dzhumanov Safarali**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Payzullakhanov Muxammade-Sultanxan Saidivalixanovich**  
Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher

**Leading organization:** **Tashkent State Technical University named after Islam Karimov**

The defense of the dissertation will be held on "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2022 at the meeting of Scientific Council DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics, (Address: INP, Ulugbek settlement 100214 Tashkent city, tel.: (+99871)289 31-41, fax: (+99871)289 36-65; e-mail: [info@inp.uz](mailto:info@inp.uz)).

The doctoral (PhD) dissertation can be looked though at the Information Resource Center of Institute of Nuclear Physics (registered under No \_\_\_\_\_). Address: INP, Ulugbek settlement, 100214 Tashkent city. tel.: (+99871) 289-31-19.

Abstract of dissertation was distributed on "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2022.  
(Registry record No \_\_\_\_\_ dated "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2022)

**M.Yu. Tashmetov**  
Chairman of the Scientific Council  
on Award of Scientific Degrees,  
D. Ph.-M.S., Professor

**O.R. Tojiboyev**  
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 (annotation of PhD dissertation)

**The aim of the research** is to reveal the regularities of the formation of a crystal structure in interstitial alloys of two sublattice metals (Ti, Mo) and non-metals (C, H) based on titanium carbide TiC.

**The tasks of the research:**

to carry out a neutron diffraction study of the different content effect of hydrogen atoms on the crystal structure of non-stoichiometric titanium carbide  $\text{TiC}_x$ ;

to carry out the neutron diffraction study of structural phase transformations in titanium carbide with different hydrogen content  $\text{TiC}_x\text{H}_y$  in the temperature range 1475-300 K;

to synthesize alloys in the Ti-Mo-C system with the replacement of some of the titanium atoms in titanium carbide TiC and to find the conditions for obtaining this alloy with the high content of molybdenum;

to carry out the structural studies of interstitial alloys  $\text{Ti}_{1-x}\text{Mo}_x\text{C}$  by neutron diffraction;

to determine the unit cell, space group, and lattice parameters of the  $\text{Ti}_{1-x}\text{Mo}_x\text{C}$  alloy;

to determine the elementary cell, space group, and lattice parameters of the  $\text{Ti}_{1-x}\text{Mo}_x\text{C}$  alloy;

to determine the microhardness of  $\text{Ti}_{1-x}\text{Mo}_x\text{C}$  alloys using the Vickers method;

to study the effect of replacing the part of metal atoms (Ti) or a part of non-metal atoms (C) in titanium carbide TiC with other types of atoms on the value of the root-mean-square displacement of atoms from an ideal position in three-component alloys  $\text{Ti}_{0.75}\text{Mo}_{0.25}\text{C}$ ,  $\text{Ti}_{0.70}\text{Mo}_{0.30}\text{C}$ ,  $\text{TiC}_{0.50}\text{N}_{0.50}$  and  $\text{TiC}_{0.30}\text{N}_{0.70}$ .

to study the effect of replacing a part of metal atoms (Ti) or a part of non-metal atoms (C) in titanium carbide TiC with other types of atoms on the value of the root-mean-square displacement of atoms from an ideal position in three-component alloys  $\text{Ti}_{0.75}\text{Mo}_{0.25}\text{C}$ ,  $\text{Ti}_{0.70}\text{Mo}_{0.30}\text{C}$ ,  $\text{TiC}_{0.50}\text{N}_{0.50}$  and  $\text{TiC}_{0.30}\text{N}_{0.70}$ .

**The object of research** are the structure of crystals and phase transformations of crystals.

**The subject of research** are the double sublattice alloys of metals (Ti, Mo) and nonmetals (C and H, C, H) crystal structure on the base of  $\text{TiC}_x$  titanium carbide of and their phase transformations.

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

it is shown that high-temperature titanium carbide  $\text{TiC}_{0.50}\text{H}_{y>0.22}$  has an ordered structure with space group (sp. gr.)  $Fd\bar{3}m$  and ordered antiphase domains (APDs) with a period of  $P=16$ ;

a number of successive stepwise (evolutionary) phase transformations were found in the Ti-C-H system, the course and phase composition of which depend on the hydrogen concentration in the FCC titanium carbide and on temperature;

a first-order concentration phase transition was found in titanium carbide  $\text{TiC}_{0.50}\text{H}_y$  at hydrogen concentrations  $y>0.50$  with a change in syngony and a sharp jump in the lattice parameter  $c$  of a face-centered cubic

structure (sp. gr.  $Fm\bar{3}m$ ) into a hexagonal close-packed structure (sp. gr.  $P\bar{3}m1$ ) at the ratio of the content of non-metals  $x=H/Ti$   $C/Ti=0.50$ ;

substantiated and demonstrated the possibility of replacing some of the titanium atoms in FCC titanium carbide with Mo atoms up to 30 % at. relationship and production of superhard interstitial alloys on a matrix of a solid solution of substitution of Ti and Mo by high-temperature sintering in the appropriate proportions of powders of titanium and molybdenum carbides.

the possibility of replacing some of the titanium atoms in FCC titanium carbide with Mo atoms up to 30 % at. ratio and obtaining superhard interstitial alloys on the matrix of a solid solution of Ti and Mo substitution by high-temperature sintering (at 2475 K) in the appropriate proportions of titanium and molybdenum carbide powders.

**Implementation of the research results.** The main results on the study of crystal structures and phase transformations in interstitial alloys with two sublattices of metals and non-metals based on titanium carbide were included in the textbook “Qattiq jism fizikasi” (I. Khidirov. – Tashkent: Mumtoz suz, 2019. – 388 p.), recommended for students of universities, technical universities and young researchers (Certificate issued on the basis of the order of the Ministry of Higher and Secondary Specialized Education of the Republic of Uzbekistan No. 531 of 06/14/2018). In particular:

information about high-temperature titanium carbide  $TiC_{0.50}H_{y>0.22}$ , which has an ordered structure with (space group  $Fd\bar{3}m$ ) and ordered antiphase domains with a period of  $P=16$  is used in the educational process within the framework of the undergraduate program in the course "Physics of the condensed state" and the master's program on a special course "Physics of Condensed Matter and Materials Science" (letters of the Nukus State Pedagogical Institute No. 01-20-09 / 51 dated January 11, 2022, Fergana State University No. 01-117 dated January 15, 2022);

information on the detection in the Ti-C-H system of a number of successive stepwise (evolutionary) phase transformations and a concentration phase transition of the first kind are used in the educational process within the framework of the undergraduate program in the course "Physics of Condensed Matter" and the Master's prog-ram in the special course "Physics of Condensed Matter and materials science” (letters of the Nukus State Pedagogical Institute No. 01-20-09/51 dated January 11, 2022, Fergana State University No. 01-117 dated January 15, 2022). The use of the results made it possible to expand the students' ideas about phase transformations in solids;

The results on the possible replacement of some of the titanium atoms in fcc titanium carbide with Mo atoms and the production of interstitial superhard alloys on a substitutional solid solution matrix by sintering are used in the educational process within the framework of the bachelor's program on the course "Physics of Condensed Matter" and the master's program on the special course " Condensed state physics and materials science”. (Letters of the Nukus State Pedagogical Institute named after Ajiniyaz. No. 01-20-09 / 51 of 01/11/2022 and Ferghana

State University No. 01-117 of 15.01.2022). The use of the results made it possible to familiarize students with new properties of condensed matter and expand students' understanding of phase transformations in solids.

**The structure and volume of the dissertation.** The dissertation work consists of an introduction, four chapters, a conclusion and a list of used literature. The volume of the thesis is 98 pages.

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

**I бўлим (I часть; part I)**

1. Хидиров И., Рахманов С.Дж. Влияние концентрации водорода на процессы образования антифазных доменов в карбогидриде титана  $TiC_xH_y$  // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2016. Т. 18. – № 6. – С. 407-411 (01.00.00. № 5).

2. Khidirov I., Rakhmanov S.J. Neutron Diffraction Study of the Phase Transformations in Titanium Carbonydride  $TiC_{0.50}H_y$  // Crystallography Reports. – Moscow, 2018. Vol. 63. No. 7. – P. 1147-1152 (№ 3. Scopus; IF=0.760).

3. Хидиров И., Рахманов С.Дж., Махмудов Ш.А., Гетманский В.В. Кристаллическая структура сплава  $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$  // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2019. Т. 21. – № 2. – С. 111-114 (01.00.00. № 5).

4. Хидиров И., Рахманов С.Дж., Махмудов Ш.А., Гетманский В.В. Нейтронографическое исследование высокотемпературного карбогидрида титана  $TiC_{0.50}H_{0.50}$  // Доклады Академии наук РУз. – Ташкент, 2019. – № 1. – С. 24-28 (01.00.00. № 7).

5. Хидиров И., Рахманов С.Дж., Махмудов Ш.А., Гетманский В.В. Определение среднеквадратичного смещения атомов в сплаве  $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$  методом дифракции нейтронов // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2020. Т. 18. – № 4. – С. 50-53 (01.00.00. № 5).

6. Хидиров И., Рахманов С.Дж., Парпиев А.С., Махмудов Ш.А., Гетманский В.В., Исмаатов Н.Б. Кристаллическая структура и свойства сплава  $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$  // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – Саров (Россия), 2020. – № 25-27. – С. 122-130 (01.00.00. № 9).

7. Khidirov I., Rakhmanov S.J., Parpiev A.S. Neutron diffraction study of the  $Ti_{1-x}Mo_xC$  alloy // Journal of Physics: Conference Series. Institute of Physics and IOP Publishing Limited. – UK, 2022. Vol. 2155. ID. 012010. – P. 1-6 (№ 3. Scopus; IF=0.7).

**II бўлим (II часть; part II)**

8. Хидиров И., Рахманов С.Дж., Парпиев А.С., Махмудов Ш.А., Гетманский В.В. Кристаллическая структура сплава  $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$  / “Ядерная физика и ядерные технологии” V Республиканская конференция молодых физиков Узбекистана. Сборник докладов. – Ташкент: Институт ядерной физики АН РУз, 2018. 4-5 декабря. – С.137-141.

9. Рахманов С.Дж., Парпиев А.С., Махмудов Ш.А., Хидиров И. Нейтронографическое определение среднеквадратичного смещения атомов в сплаве  $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$  / “Ядерная физика и ядерные технологии” VI Республиканская конференция молодых физиков Узбекистана. Сборник

докладов. – Ташкент: Институт ядерной физики АН РУз, 2020. 1-2 декабря. – С. 108-115.

10. Рахманов С.Дж., Махмудов Ш.А., Парпиев А.С., Гетманский В.В., Жаксимуратов И.Ж. Нейтронодифракционное исследование концентрационного фазового перехода в сплаве  $Ti_{0.50}Ni_y$  / “Иқтисодиёт тармоқлари ва ижтимоий соҳанинг энергия самарадорлигини оширишга қаратилган автоматлаштириш ҳамда энергетика муаммоларни ечишда илғор инновацион технологиялар ва таълимнинг ўрни” мавзусидаги Халқаро илмий анжуман. – Наманган: Наманган муҳандислик-технология институти, 2021. 24-25 июнь. – Б. 82-83.

11. Хидиров И., Рахманов С.Дж., Парпиев А.С., Махмудов Ш.А., Гетманский В., Жаксимуратов И.Ж. Нейтронографическое исследование сплава  $Ti_{1-x}Mo_xC$  / “Ядерная наука и технологии” III Международный научный форум. – Алматы (Казахстан): Институт ядерной физики, 2021. 20-24 сентября. – С. 128-129.

12. Рахманов С.Дж., Хидиров И., Махмудов Ш.А., Парпиев А.С., Гетманский В.В., Жаксимуратов И.Ж., Рафиков А.К. Кристаллическая структура и микротвердость сплава  $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$  / “Физиканинг ривожиди фундаментал-инновацион тадқиқотлар ва унинг истиқболлари” мавзусидаги Республика илмий-амалий конференцияси. – Тошкент: ЎзМУ, 2021. 14 октябрь. – Б. 86-88.

13. Рахманов С.Дж., Хидиров И., Махмудов Ш.А., Парпиев А.С., Гетманский В.В., Жаксимуратов И.Ж., Рафиков А.К.  $Ti_{1-x}Mo_xC$  қотишмасидаги атомларнинг ўртача квадратик силжишини ҳисоблаш / “Таълим сифати самарадорлигини оширишда халқаро тажрибадан фойдаланиш: муаммо ва ечимлар” мавзусидаги Халқаро илмий-амалий онлайн конференция материаллари. – Чирчиқ: Ўзбекистон Республикаси мудофаа вазирлиги Чирчиқ Олий Танк Қўмондонлик муҳандислик билим юрти, 2021. 19 октябрь. – Б. 218-219.

Автореферат “ЎзМУ хабарлари” илмий журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилиб, ўзбек ва рус тилларидаги матнлар ўзаро мувофиқлаштирилди (09.11.2022 йил).

Босмахона лицензияси:



**9338**

Бичими: 84x60 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. «Times New Roman» гарнитураси.  
Рақамли босма усулда босилди.  
Шартли босма табоғи: 2,75. Адади 100 дона. Буюртма № 71/22.

Гувоҳнома № 851684.  
«Тирограф» МЧЖ босмахонасида чоп этилган.  
Босмахона манзили: 100011, Тошкент ш., Беруний кўчаси, 83-уй.