

**SHAROF RASHIDOV NOMIDAGI SAMARQAND DAVLAT  
UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJA BERUVCHI  
PhD.03/30.12.2019.FM.02.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**SHAROF RASHIDOV NOMIDAGI SAMARQAND DAVLAT  
UNIVERSITETI**

**XOMITOV SHERZOD ASATILLO O‘G‘LI**

**O‘TKINCHI 3d - METALLAR ASOSIDAGI QOTISHMALARNING  
ELEKTR, MAGNIT VA ISSIQLIK XOSSALARINI O‘RGANISH**

**01.04.09 – Magnit hodisalari fizikasi**

**Fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi  
AVTOREFERATI**

**Samarqand – 2025**

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

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

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

**Xomitov Sherzod Asatillo o‘g‘li**

О‘tkinchi 3d - metallar asosidagi qotishmalarning elektr, magnit va issiqlik  
xossalari o‘rganish ..... 3

**Хомитов Шерзод Асатилло угли**

Исследование электрических, магнитных и термических свойств сплавов на  
основе переходных 3d металлов ..... 27

**Khomitov Sherzod Asatillo ugli**

Study of electrical, magnetic and thermal properties of alloys based on transition  
3d metals ..... 51

**E‘lon qilingan ishlar ro‘yxati**

Список опубликованных работ

List of published works ..... 55

**SHAROF RASHIDOV NOMIDAGI SAMARQAND DAVLAT  
UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJA BERUVCHI  
PhD.03/30.12.2019.FM.02.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**SHAROF RASHIDOV NOMIDAGI SAMARQAND DAVLAT  
UNIVERSITETI**

**XOMITOV SHERZOD ASATILLO O‘G‘LI**

**O‘TKINCHI 3d - METALLAR ASOSIDAGI QOTISHMALARNING  
ELEKTR, MAGNIT VA ISSIQLIK XOSSALARINI O‘RGANISH**

**01.04.09 – Magnit hodisalari fizikasi**

**Fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi  
AVTOREFERATI**

**Samarqand – 2025**

**Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida № B2024.4.PhD/FM1203 raqam bilan ro'yxatga olingan.**

Dissertatsiya Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universitetida bajarilgan.  
Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengashning veb-sahifasida ([www.samdu.uz](http://www.samdu.uz)) va «Ziyonet» Axborot ta'lim portalida ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)) joylashtirilgan.

**Ilmiy rahbar:** **Rajabov Rustam Mustafoyevich**  
fizika-matematika fanlari nomzodi, dotsent

**Rasmiy opponentlar:** **Sharipov Mirzo Zokirovich**  
fizika-matematika fanlari doktori, professor

**O'sarov O'ktam Turatovich**  
fizika-matematika fanlari nomzodi, professor

**Yetakchi tashkilot:** **Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti**

Dissertatsiya himoyasi Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti huzuridagi PhD.03/30.12.2019.FM.02.04 raqamli Ilmiy kengashning 2025-yil «12» 06 soat 11<sup>30</sup> dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 140104, Samarqand shahri, Universitet xiyoboni, 15-uy. Tel.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; faks: (99866) 239-11-40; E-mail: [rektor@samdu.uz](mailto:rektor@samdu.uz) Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti Muhandislik fizikasi instituti, 1-qavat, 114-xona).

Dissertatsiya bilan Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (46-raqami bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 140104, Samarqand shahri, Universitet xiyoboni, 15-uy. Tel.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; faks: (99866) 239-11-40).

Dissertatsiya avtoreferati 2025-yil «21» 05 kuni tarqatildi.  
(2025-yil «21» 05 dagi 46 raqamli reyestr bayonnomasi).



**M.X.Ashurov**  
Ilmiy darajalar beruvchi  
ilmiy kengash raisi,  
f.-m.f.d., akademik

**R.M.Rajabov**  
Ilmiy darajalar beruvchi  
ilmiy kengash ilmiy kotibi,  
f.-m.f.n., dotsent

**D.I.Semenov**  
Ilmiy darajalar beruvchi  
ilmiy kengash huzuridagi  
Ilmiy seminar raisi,  
f.-m.f.d., dotsent

## KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati.** Dunyoda hozirgi vaqtda fan va texnikaning tez sur'atlar bilan rivojlanishi metall va qotishmalarning elektr, magnit, galvanomagnit va issiqlik xossalari bo'yicha ko'p sonli tadqiqotlarni yechishni kun tartibiga qo'yimoqda. Bugungi kunda 3d-metallari asosidagi amorf ferromagnit qotishmalarning fizik xossalari va ichki tuzilishini o'rganish muhim masala hisoblanadi. Metallar va ularning qotishmalariga temperaturaning ta'siri ularning strukturaviy, hajmiy o'zgarishlari va erish jarayoni haqida muhim ma'lumotlar olish imkonini beradi. Bu esa amaliy jihatdan mashinasozlikda, metallarga termik ishlov berishda va muhandislik hisoblarida muhim ahamiyat kasb etadi. Amorf metall qotishmalarning fizik xossalarini o'rganish shu qotishmalarning suyuq holatdagi tarkibi va fizik xususiyatlari to'g'risida ma'lumot olish imkonini beradi. Bu xususiyatlar atomlari tartibsiz qotishmalar nazariyasini tahlil etishga xizmat qiladi, bu esa qattiq va suyuq metallar fizikasi, materialshunoslik va metallurgiya sanoati uchun muhim sanaladi.

Jahonda o'tkazilayotgan ko'p sonli tadqiqotlarning natijalari shundan dalolat beradiki, metall sistemalarning issiqlikka chidamliligi ularning individual xususiyatlariga: elektron tuzilishi, erish temperaturasini xarakterlovchi atomlararo bog'lanishiga, elastiklik moduliga, xarakteristik temperaturasiga bog'liqdir. Bu kabi masalalarni yechish metallarning elektr o'tkazuvchanligi, magnit va galvanomagnit xossalari hamda issiqlik xossalarini kompleks o'rganish orqali amalga oshirilgan. 3d metallari asosidagi qotishmalardan tayyorlangan materiallar, ularning magnit xossasiga ko'ra katta energiyali doimiy magnitlar tayyorlashda, xotira saqlovchi qurilmalarda, kichik hajmli transformatorlarning o'zagi uchun magnitayumshoq material sifatida foydalanilmoqda. Ularning qo'llanilish chegarasini yanada oshirish maqsadida yuqorida zikr etilgan fizik xossalarni, chuqur o'rganish bugungi kunda ham dolzarb masalalardan biri sanaladi.

Mamlakatimizda fundamental fanlarning amaliy rivojlanishiga, jumladan, sanoatda keng foydalaniladigan o'tkinchi metallar asosidagi qotishmalarda yuz beradigan fizik hodisalarni tadqiq qilishga katta e'tibor qaratilmoqda. Amorf metall qotishmalarning fizik xususiyatlarini o'rganish ularning bevosita amaliyotdagi qo'llanilishi bilan bog'liq. Fan va texnika rivojlanib borayotgan hozirgi sharoitda elektron texnikada qo'llanilayotgan magnit materiallarga talab kundan kunga oshib bormoqda. Bunda amorf metall qotishmalar alohida o'rin egallab, ulardan elektron texnikada keng foydalanilmoqda. Shuning uchun bunday qotishmalarning elektr, magnit, galvanomagnit va issiqlik xossalarini metalloidlar konsentratsiyasi hamda temperaturaga bog'liq holda o'zgarishlarini o'rganish dolzarb vazifalardan biri hisoblanadi.

Ushbu dissertatsiya ishi O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2019 yil 8-oktyabrdagi PF-5847-sonli "O'zbekiston Respublikasi oliy ta'lim tizimini 2030-yilgacha rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash to'g'risida" gi Farmoni, 2020-yil 29-dekabrdagi Oliy Majlisga Murojaatnomasi<sup>1</sup>, 2021 yil 19-martdagi

---

<sup>1</sup>Mirziyoyev Sh.M. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining Oliy Majlisga Murojaatnomasi // Xalq so'zi, 2020 yil, 30 dekabr, №275-276(7746-7747), 1-bet.

PQ-5032-sonli “Fizika sohasidagi ta’lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to’g’risida” gi Qarori, 2022-yil 13-yanvardagi PQ-82-son “Samarqand davlat universiteti faoliyatini yanada takomillashtirishga doir qo’shimcha chora-tadbirlar to’g’risida”gi Qarori hamda mazkur faoliyatga aloqador boshqa me’yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga muayyan darajada xizmat qiladi.

**Tadqiqotning Respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo’nalishlariga mosligi:** Dissertatsiya Respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining II. «Fizika, astronomiya, energetika va mashinasozlik» kabi ustuvor yo’nalishlariga muvofiq bajarildi.

**Muammoning o’rganilganlik darajasi:** O’tkinchi metallar asosidagi qotishmalarning elektr, magnit, galvanomagnit hamda issiqlik xossalari o’rganilgan bo’lsada, bu xususiyatlarning kompleks o’rganilganligi va bu xossalarning o’zaro aloqadorligiga bag’ishlangan ishlar kam uchraydi. Shularni e’tiborga olgan holda yuqorida keltirilgan xususiyatlarni kompleks o’rganish va bu xususiyatlarni o’zaro aloqadorligini ko’rsatish ishning asosiy qismi hisoblanadi. Bu masalalar to’liq hal etilsa ulardan amaliy maqsadlarda foydalanish imkoniyatini kengaytiradi.

So’nggi yillarda chet el olimlari: Dora Janovszky, Maria Sveda, (Hungary), M.L.Lobanov, S.V.Grib, L.Yu.Fetisov, Yu.K.Fetisov, N.S.Perov, D.V.Chashin, V.A.Kataev, R.S.Isxakov, V.Vedyaev, A.B.Granovskiy, A.L.Xoroshilov, A.S.Makarov, I.E.Permyakova (Rossiya), M.Yu.Barabash, L.Yu.Kunyts’ka, L.G.Khomenko, Yu.A.Kunyts’ky (Ukraina), J. Hemalatha (Hindiston), Lingxiang Shi, Xiaolu Qin, Kefu Yao, Y.Z.Wang, F.M.Yang, Y.S.Wu, M.Y.Feng, W.S.Zhan (Xitoy), M.M.Safarov (Tojikiston) lar tomonidan ferromagnit qotishmalarning turli xossalarni o’rganib fanning rivojiga katta hissa qo’shganlar.

O’zbekistonlik olimlardan xususan, akademik K.Muqimov, professorlar: O.Q.Quvondiqov, U.Valiyev, D.Jo’rayev, M.T.Normuradov, F.Axmedjanov, M.Sharipov, Sh.Raximov, A.S.Saidov, E.U.Arziqulov, O’.Usarov, dotsentlar: X.Shakarov, H.M.Norqorayev, I.Subhonqulov, N.S.Xamraev, R.M.Rajabov va boshqalar ushbu sohada uzoq yillar mobaynida ilmiy izlanishlar qilib, metall qotishmalar olinish usullarini, ularning elektr, magnit, galvanomagnit, magnitoptik, akustik va issiqlik xossalarni ham nazariy ham tajribaviy jihatdan o’rganganlar.

Oxirgi yillarda o’tkazilgan eksperimental va nazariy tadqiqotlar tahlili shuni ko’rsatdiki, temir guruhi elementlari asosidagi qotishmalarning elektr, magnit va issiqlik xossalari va ularning o’zaro aloqadorligi bo’yicha ma’lumotlar kam o’rganilgan hamda ularning magnit tabiatining turlicha bo’lish sabablari yetarli darajada o’rganilmagan.

**Tadqiqotning dissertatsiya bajarilgan oliy ta’lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejaları bilan bog’liqligi.** Dissertatsiya ishi Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti ilmiy-tadqiqotlar o’tkazish rejasi doirasida, Umumiy fizika kafedrasining bosh ilmiy mavzusi: 2/7 d.q.r. 01860103966-raqamli “O’tkinchi va siyrak yer elementlari asosidagi qotishmalar, intermetallik birikmalarlarning elektr, magnit va galvanomagnit xossalarni

atomlarning tartibli va tartibsiz bo'lgan holda o'rganish" mavzusi doirasida bajarilgan.

**Tadqiqotning maqsadi:** amorf holatdagi o'tkinchi 3d-metallari asosidagi qotishmalarning elektr, magnit, galvanomagnit va issiqlik xossalari bo'yicha tajriba natijalarini olish va bu xususiyatlarni ferromagnit va paramagnit sohada tahlil qilishdan iborat.

**Tadqiqotning vazifalari:**

Fe-Ni-Si-C va Fe-Cr-B sistemasi qotishmalarining solishtirma elektr qarshiligi, Xoll koeffitsiyenti va solishtirma issiqlik sig'imi namunalarning amorf holatidan kristall holatga o'tish nuqtasigacha bo'lgan oraliqda temperaturaga bog'liqligi bo'yicha tajriba natijalarini olish;

o'rganilayotgan amorf qotishmalarning tuzilishi, issiqlik barqarorligi va kinetik xususiyatlariga metalloid konsentratsiyasining ta'sirini o'rganish;

o'tkinchi 3d-metallarning ferromagnit amorf qotishmalarining kristall holatga o'tish sohasida elektr, galvanomagnit va issiqlik xossalarini o'rganish;

amorf holatdagi Fe-Ni-Si-C va Fe-Cr-B sistemasiga kiruvchi qotishmalarning ferromagnit-paramagnit fazaviy o'tish sohasida solishtirma elektr qarshiligi, Xoll koeffitsiyenti va solishtirma issiqlik sig'imining temperaturaga bog'liqligini o'rganish.

**Tadqiqotning ob'ekti** sifatida temir guruhi elementlari asosidagi Fe-Ni-Si-C sistemasiga kiruvchi  $Fe_{67.3}Ni_{18.2}Si_{5.1}C_{9.4}$ ,  $Fe_{68.5}Ni_{19.1}Si_{4.9}C_{7.5}$ ,  $Fe_{70.5}Ni_{18.3}Si_{5.0}C_{6.2}$  va  $Fe_{71.6}Ni_{18.7}Si_{5.0}C_{4.7}$  hamda Fe-Cr-B sistemasiga kiruvchi  $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$ ,  $Fe_{73}Cr_{12}B_{15}$ ,  $Fe_{75}Cr_{10}B_{15}$  va  $Fe_{77}Cr_{8}B_{15}$  amorf qotishmalar tanlab olingan.

**Tadqiqotning predmeti** shu bilan xarakterlanadiki, 3d metallari asosidagi qotishmalarning elektr, magnit, galvanomagnit hamda issiqlik xossalarini kompleks tadqiq qilish, ular o'rtasidagi bog'liqlikni o'rnatish va bu bog'liqlikni anomal Xoll effekti nazariyasi nuqtai nazaridan izohlash hamda tajriba natijalariga asoslanib, effektiv spin-orbital o'zaro ta'siri parametrini baholashdan iborat.

**Tadqiqot usullari:** Tadqiqot ishida temir guruhi elementlari asosidagi amorf qotishmalarning fizik xossalarini o'lchashda quyidagi usullardan foydalanilgan: element miqdor tarkibini rentgenospektral analiz (EDX) usuli, atomlar joylashuvi va diametrini o'lchashning morfologik tahlilini skanerlovchi elektron mikroskop (SEM) usuli orqali, namunalar tuzilish holatini o'rganishning rentgenofazaviy tahlil (X-ray diffraction analysis) usuli, solishtirma elektr qarshiligi hamda Xoll effektini o'lchashning Van-der-Pau usuli, solishtirma magnitlanishini o'lchashning tebranishli magnetometr usuli, namunalar issiqlik sig'imini o'lchashning kalorimetrik usuli kabi usullardan foydalanilgan.

**Tadqiqotning ilmiy yangiligi** quyidagilardan iborat:

ilk bor Fe-Ni-Si-C va Fe-Cr-B sistemasi amorf qotishmalarining solishtirma elektr qarshiligi, Xoll koeffitsiyenti va solishtirma issiqlik sig'imi namunalarning amorf holatidan kristall holatga o'tish nuqtasigacha bo'lgan temperatura oralig'ida kompleks eksperimental natijalar olingan;

Fe-Ni-Si-C va Fe-Cr-B sistemasi amorf qotishmalarining solishtirma elektr qarshiligi, Xoll koeffitsiyenti va solishtirma issiqlik sig'imining temperaturaga

bog'liqligi o'rganilib, ikkinchi tur ferromagnit-paramagnit fazaviy o'tish aniqlangan;

metalloidlar (Si+C) ning Fe-Ni-Si-C sistemasi namunalarining tuzilishi, issiqlik barqarorligi va kinetik xususiyatlariga ta'siri o'rganilgan. O'rganilgan amorf qotishmalarda metalloidlar konsentratsiyasining ortishi bilan Xoll ko'effitsiyentining qiymati va kristallanish temperaturasi ortishi, Kyuri temperaturasi esa kamayishi aniqlangan;

anomal Xoll ko'effitsiyenti va solishtirma elektr qarshiligi o'rtasidagi bog'liqlik, shuningdek, metalloidlar konsentratsiyasining amorf qotishmalarda qarshilikning mutlaq qiymati va termik ko'effitsiyentiga ta'siri amorf holatda Vedyayev-Granovskiy nazariyasi bilan Muidji koorrelyatsiyasining muvofiqligi ko'rsatilgan;

Fe-Ni-Si-C va Fe-Cr-B sistemasiga kiruvchi amorf qotishmalarda solishtirma issiqlik sig'imining temperaturaga bog'liqligining eksperimental ravishda topilgan natijalari asosida amorf holatdan kristall holatga o'tishda nanokristall sohalarning hosil bo'lishi ko'rsatilgan.

**Tadqiqotning amaliy natijasi** shundan iboratki,

Fe-Ni-Si-C hamda Fe-Cr-B sistemasiga kiruvchi amorf qotishmalarning solishtirma issiqlik sig'imi  $C_p(T)$  ning temperaturaga bog'liqligidan, Kyuri temperaturasi  $T_C$ , kristallanish temperaturasi  $T_K$  va issiqlik effekti  $\Delta H$  entalpiyaning o'zgarishi aniqlandi.

O'tkinchi metallar asosidagi amorf ferromagnit qotishmalarga temperatura va tashqi magnit maydonining ta'siri orqali ularda yuz beradigan fazaviy o'tishlarni aniqlash mumkinligi ko'rsatildi.

Amorf ferromagnit qotishmalarga elektr, magnit, galvanomagnit va issiqlik xossalari kompleks tarzda tadqiq qilish orqali ularda yuz beradigan spin-orbital o'zaro ta'sir tabiatini baholash mumkinligi ko'rsatildi.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi** tadqiqotda o'rganilgan namunalarning elektr, magnit, galvanomagnit va issiqlik xossalarini tadqiq qilishda ilmiy tadqiqotlarda keng qo'llaniladigan ishonchli eksperimental tekshiruv usullari va tajriba o'tkazish imkoniyati yuqori bo'lgan qurilmalarda amalga oshirilganligi; tajribada olingan natijalarning nazariy va tajribaviy qiymatlarining o'zaro yaxshi mos kelganligi; o'lchash xatoliklarining tahlil qilinganligi; olingan natijalarning mavjud fizik tasavvurlar hamda ilmiy adabiyotlarda keltirilgan ma'lumotlarga zid kelmasligi, shuningdek, Scopus ma'lumotlar bazasida indekslanuvchi ilmiy jurnallarda e'lon qilinganligi bilan tasdiqlangan.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.** Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati shundan iboratki, dissertatsiya ishida olingan ilmiy natijalar o'tkinchi 3d-elementlar asosidagi amorf ferromagnit qotishmalarning elektr, magnit va issiqlik xossalarini tushuntirishda, shuningdek kondensirlangan holat nazariyasini, xususan atomlari tartibsiz qotishmalar nazariyasini tahlil etishga xizmat qiladi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati shundaki, 3d-elementlar asosidagi amorf qotishmalarning elektr, magnit va galvanomagnit xossalarini tadqiq qilish

orqali koersitiv kuch qiymatlari asosida ulardan transformatorlarning o‘zagi va elektron asboblarning elementlari sifatida foydalanish mumkinligi ko‘rsatildi.

#### **Tadqiqot natijalarining amaliyotga joriy qilinishi.**

Fe-Ni-Si-C sistemasiga kiruvchi amorf qotishmalarning tuzilishi, morfologiyasi va elektr xossalari tajriba natijalari FZGM-2023-0006-sonli loyiha doirasida olib borilgan tadqiqotlarda foydalanilgan (Rossiya Federatsiyasi Voronej davlat texnika universiteti. 2025 yil 20-yanvardagi dalolatnomasi). Ilmiy natijalarning qo‘llanilishi temir guruhi elementlari asosidagi yupqa plyonkali nanokompozit materiallarning termik stabiligini tushuntirish imkonini bergan;

Dissertatsiya ishidagi amorf ferromagnit qotishmalarning issiqlik sig‘imining temperaturaga bog‘liqlik natijalari organik moddalarning issiqlik xossalarini tushuntirishda foydalanilgan (M.S.Osimiy nomidagi Tojikiston texnika universiteti. 2025-yil 14-fevraldagi dalolatnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish ushbu moddalarda issiqlik effektlarni aniqlash imkonini bergan;

**Tadqiqot natijalarining aprotatsiyasi.** Dissertatsiya ishining natijalari 9 ta Respublika va 8 ta Xalqaro miqyosidagi ilmiy-amaliy anjumanlarda ma‘ruzalar qilinib tegishli muhokamalardan o‘tkazilgan va natijalar konferensiyalarning materiallari hamda tezislari to‘plamida chop etilgan.

**Tadqiqot natijalarining e‘lon qilinganligi.** Tadqiqot mavzusi bo‘yicha jami 24 ta ilmiy ish, shu jumladan, O‘zbekiston Respublikasi Oliy Attestatsiya komissiyasining dissertatsiyalar asosiy ilmiy natijalarini chop etish uchun tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 7 ta maqola (3 ta Scopus bazasidagi va 4 ta Respublika jurnallarida), 17 ta Xalqaro va Respublika miqyosida o‘tkazilgan konferensiyalarning materiallari hamda tezislari to‘plamida chop etilgan.

**Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi.** Dissertatsiya kirish, to‘rtta bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxatidan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 41 ta rasm va 8 ta jadvalni o‘z ichiga olgan holda 114 betni tashkil etadi.

## **DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI**

Dissertatsiyaning “**Kirish**” qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqotlarning respublika fan va texnika taraqqiyotining asosiy ustivor yo‘nalishlari bilan bog‘liqligi aniqlangan, muammoning o‘rganilganlik darajasi, vazifa va maqsadning shakllantirilganligi, aniqlangan ob‘ektlar, tadqiqot usuli va predmeti, tadqiqotning ilmiy yangiligi tushuntirilgan, olingan natijalarning ishonchliligi asoslangan, ularning nazariy va amaliy ahamiyati ochilgan, ishning aprotatsiyasi va natijalarning joriy qilinishi haqida qisqacha ma‘lumotlar hamda dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi keltirilgan.

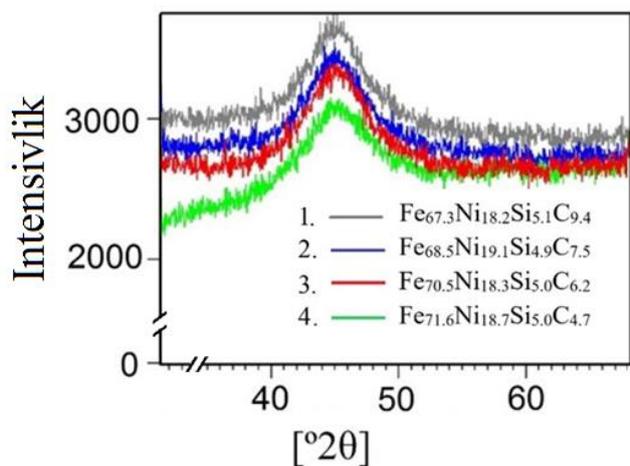
Dissertatsiyaning “**O‘tkinchi 3d - metallar asosidagi qotishmalarning tuzilishi hamda elektr, magnit va issiqlik xossalari (Adabiyotlar sharhi)**” deb nomlangan birinchi bobida amorf ferromagnit qotishmalarning olinish usullari va qo‘llanilish sohalari, fizik xossalari tegishli tajriba va nazariy o‘rganishga bag‘ishlangan adabiyotlar sharhi keltirilgan.

Shuningdek, amorf qotishmalar elektr, galvanomagnit, magnit va issiqlik xossalari nazariy asoslari, ahamiyati va zamonaviy tadqiqot usullari to‘g‘risida

ma'lumotlar keltirilgan. Bunday ma'lumotlar dissertatsiya ishining maqsadi, uni amalga oshirish va olingan natijalarni tahlil qilishda muhim ahamiyat kasb etadi. Birinchi bob oxirida bob bo'yicha xulosa va muammoning bayoni keltirilgan.

Dissertatsiyaning **“Tajriba tadqiqotlarining texnikasi va usullari”** deb nomlangan ikkinchi bobida tadqiqot namunalari sifatida Fe-Ni-Si-C sistemasiga kiruvchi  $\text{Fe}_{67.3}\text{Ni}_{18.2}\text{Si}_{5.1}\text{C}_{9.4}$ ,  $\text{Fe}_{68.5}\text{Ni}_{19.1}\text{Si}_{4.9}\text{C}_{7.5}$ ,  $\text{Fe}_{70.5}\text{Ni}_{18.3}\text{Si}_{5.0}\text{C}_{6.2}$  va  $\text{Fe}_{71.6}\text{Ni}_{18.7}\text{Si}_{5.0}\text{C}_{4.7}$  hamda Fe-Cr-B sistemasiga kiruvchi  $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ ,  $\text{Fe}_{73}\text{Cr}_{12}\text{B}_{15}$ ,  $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{10}\text{B}_{15}$  va  $\text{Fe}_{77}\text{Cr}_8\text{B}_{15}$  amorf qotishmalar olindi. Namunalarning tuzilishi, morfologiyasini o'rganish maqsadida foydalanilgan SEM - EVO MA 10 (Zeiss, Germany) skanerlash elektron mikroskopi, XRD Malvern PANalytical® Empyrean Series 3 rentgen difraktometri, solishtirma elektr qarshilik va Xoll effektini o'lchashning Van der-Pau usuliga asoslangan qurilma, solishtirma issiqlik sig'imini o'lchovchi STA PT 1600 kalorimetrik sinxron termoanalizator va magnitlanishni o'lchovchi tebranishli magnetometr tajriba qurilmalarining tuzilishi va ishlash prinsipi bayon qilingan. Batafsil tahlillar ko'rsatdiki, ushbu qurilmalarda olib borilgan o'lchashdagi maksimal xatolik 3% dan oshmaydi.

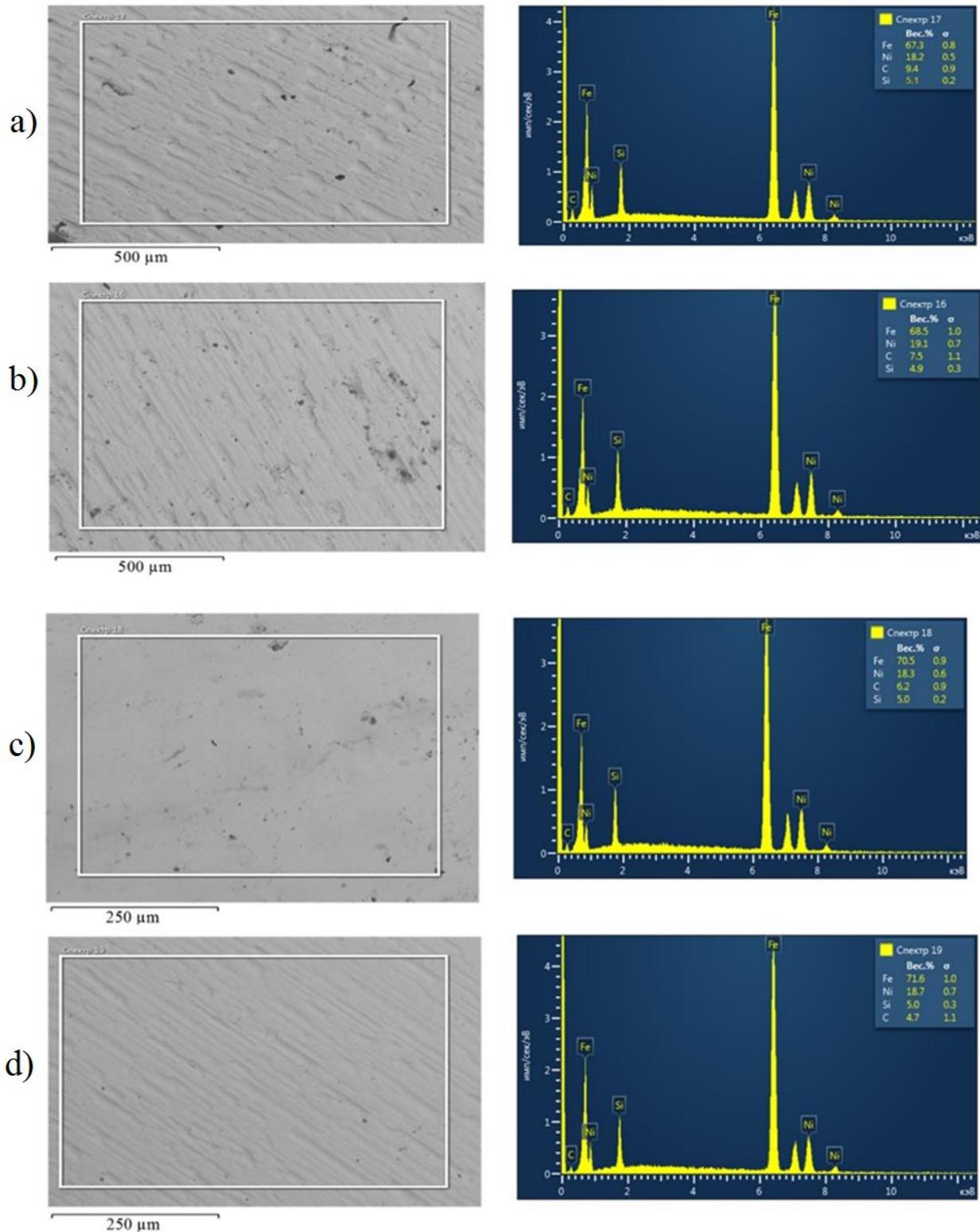
Dissertatsiyaning uchinchi bobi **“Fe-Ni-Si-C sistemasiga kiruvchi amorf qotishmalarning elektr, galvanomagnet va issiqlik xossalari hamda ular o'rtasidagi aloqadorlik”** deb nomlangan bo'lib, ishda tarkibida Fe-Ni-Si-C elementlari bo'lgan amorf qotishmalarning tuzilishi rentgenofazoviy tahlil usulida o'rganildi. Bunda lenta ko'rinishidagi namunadan  $10 \times 10 \times 0.025$  mm o'lchamda olinib, maxsus kyuvetaga joylashtirildi va uning sirtiga monoxromatik rentgen nurlari  $10 - 70^\circ$  burchak ostida tushirildi. Natijada Rentgen nurlari Vulf – Bregg shartini qanoatlantiruvchi burchak ostida joylashgan namunada difraksiyalanadi. Difraksiyalangan Rentgen nurlari intensivligining namuna sirtiga tushish burchagiga bog'liqlik spektridan namunalarning tuzilishi tahlil qilindi. Olingan natijalar 1-rasmda ko'rsatilgan. 1-rasmdan ko'rinadiki XRD spektrning diffraksiya  $2\theta = 40^\circ - 50^\circ$  burchaklar oralig'ida keng spektrni berdi va  $45^\circ$  da maksimum kuzatildi. Bu maksimum namunaning amorf holatiga to'g'ri keladi.



**1-rasm. «XRD- Panalytical Empyrean» rentgen difraktometrida olingan Fe-Ni-Si-C sistemasiga kiruvchi  $\text{Fe}_{67.3}\text{Ni}_{18.2}\text{Si}_{5.1}\text{C}_{9.4}$ ,  $\text{Fe}_{68.5}\text{Ni}_{19.1}\text{Si}_{4.9}\text{C}_{7.5}$ ,  $\text{Fe}_{70.5}\text{Ni}_{18.3}\text{Si}_{5.0}\text{C}_{6.2}$  va  $\text{Fe}_{71.6}\text{Ni}_{18.7}\text{Si}_{5.0}\text{C}_{4.7}$  qotishmalarning rentgen spektri.**

Namunalarning elementlar tarkibi o'rtasidagi muvofiqlikni aniqlash uchun SEM - EVO MA 10 (Zeiss, Germany) skanerlash elektron mikroskopidan foydalanildi. Fe-Ni-Si-C sistemasiga kiruvchi qotishmalarning ushbu mikroskopda olingan tasvirlari 2-rasmda keltirilgan. Barcha namunalar uchun tasvirlar

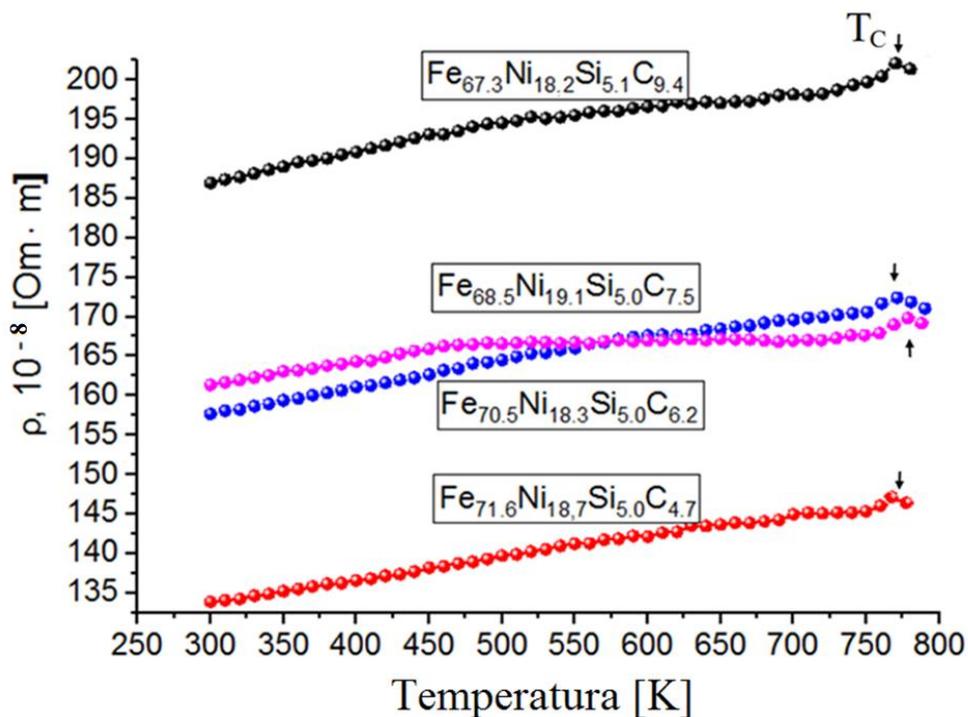
skanerlovchi elektron mikroskop yordamida 250÷500 μm masshtabda olindi. 2-rasmning tahlili koʻrsatadiki, namunalar tarkibidagi elementlarning miqdori ishlab chiqaruvchilar tomonidan taqdim etilgan qiymati bilan yaxshi mos keladi.



**2-rasm. Skanerlovchi elektron mikroskop (SEM) yordamida amorf holatda Si va C metalloidlari qoʻshilgan Fe va Ni asosidagi qotishmalarning elementlar tarkibi tasvirlari: a)  $\text{Fe}_{67.3}\text{Ni}_{18.2}\text{Si}_{5.1}\text{C}_{9.4}$ , b)  $\text{Fe}_{68.5}\text{Ni}_{19.1}\text{Si}_{4.9}\text{C}_{7.5}$ , c)  $\text{Fe}_{70.5}\text{Ni}_{18.3}\text{Si}_{5.0}\text{C}_{6.2}$ , d)  $\text{Fe}_{71.6}\text{Ni}_{18.7}\text{Si}_{5.0}\text{C}_{4.7}$ .**

Amorf holatdagi Fe-Ni-Si-C sistemasiga kiruvchi ferromagnit qotishmalarda solishtirma elektr qarshiligi  $\rho$  va Xoll koeffitsiyenti  $R_H$  ning temperatura T ga bog'liqligini xona temperaturasidan to 773K temperatura oralig'ida eksperimental o'rganildi. Ushbu ferromagnit qotishmalarning solishtirma elektr qarshiligi  $\rho$  va Xoll koeffitsiyentining temperatura T ga bog'liqligini Van der Pau usuli yordamida o'lchandi.

$\text{Fe}_{67.3}\text{Ni}_{18.2}\text{Si}_{5.1}\text{C}_{9.4}$ ,  $\text{Fe}_{68.5}\text{Ni}_{19.1}\text{Si}_{5.0}\text{C}_{7.5}$ ,  $\text{Fe}_{70.5}\text{Ni}_{18.3}\text{Si}_{5.0}\text{C}_{6.2}$  va  $\text{Fe}_{71.6}\text{Ni}_{18.7}\text{Si}_{5.0}\text{C}_{4.7}$  amorf qotishmalarning solishtirma elektr qarshiligining temperaturaga bog'liqligi 3-rasmda tasvirlangan.



**3-rasm. Amorf holatdagi Fe-Ni-Si-C sistemasiga kiruvchi qotishmalarning solishtirma elektr qarshiligining temperaturaga bog'liqligi.**

3-rasmdan ko'rinadiki, o'rganilgan barcha amorf ferromagnit qotishmalar uchun solishtirma elektr qarshilik temperatura oshishi bilan ortib borishi kuzatilgan.

Namunalar tarkibida metalloidlarning (Si+C) konsentratsiyasining oshishi, tok tashuvchi zaryadlarning sonining kamayishiga va uning tarqalish potensialining oshishiga, bu esa namunalar solishtirma elektr qarshiligi  $\rho$  ni oshishiga olib keladi, qarshilikning temperatura koeffitsiyenti  $\partial\rho/\partial T$  esa kamayadi. O'rganilayotgan qotishmalarning solishtirma elektr qarshiligining temperaturaga bog'liqligini tahlil qilish korsatadiki, metalloidlarning konsentratsiyasi ortishi bilan solishtirma elektr qarshiligining mutlaq qiymati  $\rho_0$  ortadi va uning temperatura koeffitsiyenti  $\partial\rho/\partial T$  kamayadi.

O'rganilgan namunalar uchun xona temperaturasida solishtirma elektr qarshilik  $\rho$  ning mutlaq qiymati, qarshilikning temperatura koeffitsiyenti  $\partial\rho/\partial T$  va Kyuri harorati  $T_C$  natijalari 1-jadvalda keltirilgan.

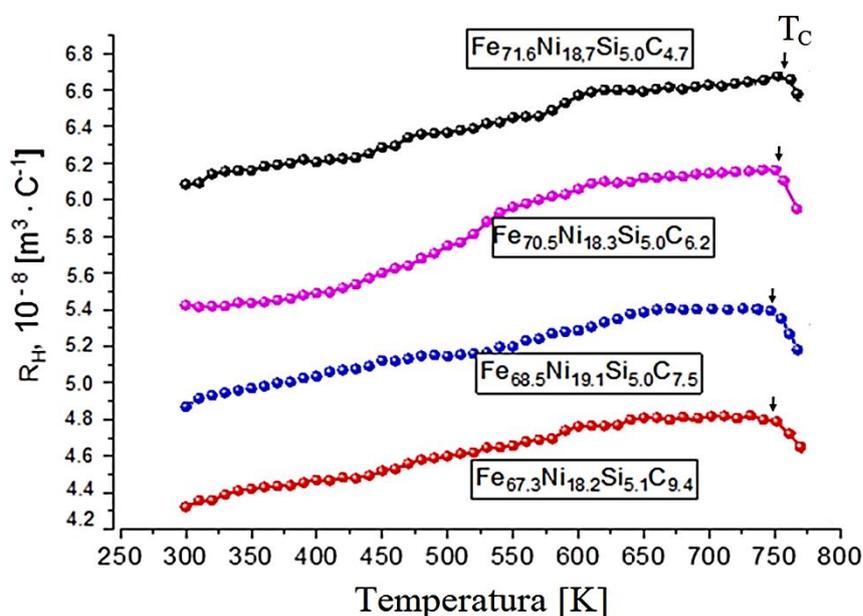
1-jadval.

Fe-Ni-Si-C sistemasiga kiruvchi qotishmalarning mutlaq solishtirma elektr qarshiligi  $\rho_0$ , qarshilikning temperatura ko'effitsiyenti  $\partial\rho/\partial T$  va Kyuri temperaturasi  $T_C$  natijalari

| Namuna   | %<br>(Si+C) | $\rho_0$<br>$\times 10^{-8} \Omega m$ | $\partial\rho/\partial T$<br>$\times 10^{-10} \Omega m K^{-1}$ | $T_C$ ,<br>K |
|--|-------------|---------------------------------------|--|--------------|
| Fe <sub>71.6</sub> Ni <sub>18.7</sub> Si <sub>5.0</sub> C <sub>4.7</sub> | 9,7         | 134.8                                 | 3,86   | 770          |
| Fe <sub>70.5</sub> Ni <sub>18.3</sub> Si <sub>5.0</sub> C <sub>6.2</sub> | 11,2        | 157.5                                 | 3,44   | 767          |
| Fe <sub>68.5</sub> Ni <sub>19.1</sub> Si <sub>4.9</sub> C <sub>7.5</sub> | 12,5        | 162                                   | 3,3  | 764          |
| Fe <sub>67.3</sub> Ni <sub>18.2</sub> Si <sub>5.1</sub> C <sub>9.4</sub> | 14,5        | 187                                   | 3,15   | 761          |

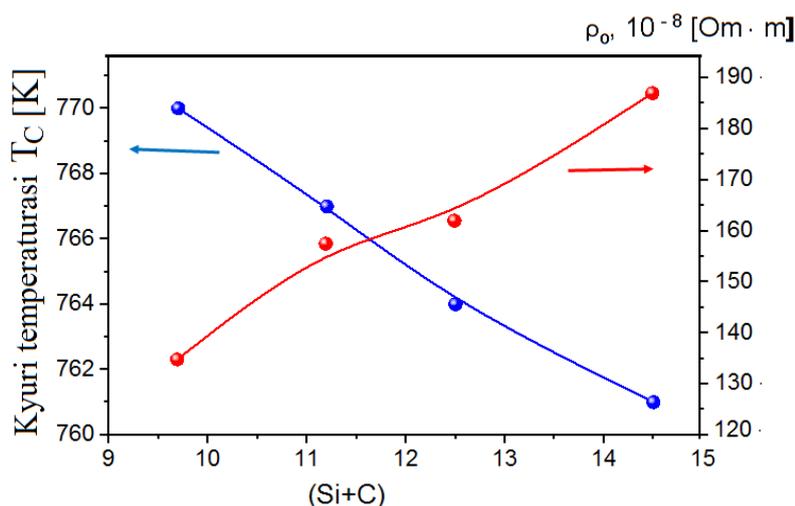
1-jadvaldan ko'rinib turibdiki, namunalar tarkibida metalloidlarning (Si+C) konsentratsiyasining ortishi bilan Kyuri temperaturasi  $T_C$  ning kamayishi kuzatiladi. Bunga sabab, namunada ferromagnit metallar konsentratsiyasining kamayishi ferromagnit atomlari orasidagi almashinuv o'zaro ta'sir energiyasini kamayishiga, bu esa Kyuri temperaturasini kamayishiga olib keladi deyish mumkin. O'z navbatida, metalloidlarning konsentratsiyasining oshishi namunada effektiv zaryad tashuvchilarning sonini kamaytiradi, bu esa solishtirma elektr qarshiligining mutlaq qiymatining oshishiga olib keladi.

Amorf holatdagi Fe-Ni-Si-C sistemasiga kiruvchi ferromagnit qotishmalar Xoll ko'effitsiyenti  $R_H$  ning temperatura  $T$  ga bog'liqligini eksperimental ravishda xona haroratidan boshlab, 773 K gacha bo'lgan temperatura oralig'ida eksperimental tadqiq qilindi. Tajribalar Van der Pau usuliga asoslangan Xoll effektini o'lchash qurilmasi yordamida amalga oshirildi. Fe-Ni-Si-C sistemasiga kiruvchi Fe<sub>67.3</sub>Ni<sub>18.2</sub>Si<sub>5.1</sub>C<sub>9.4</sub>, Fe<sub>68.5</sub>Ni<sub>19.1</sub>Si<sub>4.9</sub>C<sub>7.5</sub>, Fe<sub>70.5</sub>Ni<sub>18.3</sub>Si<sub>5.0</sub>C<sub>6.2</sub> va Fe<sub>71.6</sub>Ni<sub>18.7</sub>Si<sub>5.0</sub>C<sub>4.7</sub> amorf qotishmalarning Xoll ko'effitsiyenti  $R_H$  ning temperaturaga bog'liqligi 4 - rasmda tasvirlangan.



4-rasm.  
Fe-Ni-Si-C sistemasiga kiruvchi amorf qotishmalarning Xoll ko'effitsiyentining temperaturaga bog'liqligi

4-rasmdan ko‘rinadiki, namunalar Xoll koeffitsiyenti temperatura ortishi bilan ortib boradi. Temperaturaning ma’lum bir qiymatiga yetganda Xoll koeffitsiyentining sakrab kamayishi kuzatiladi. Bu temperaturalar namunalar uchun mos ravishda:  $\text{Fe}_{67.3}\text{Ni}_{18.2}\text{Si}_{5.1}\text{C}_{9.4}$  uchun  $T_K=761$  K,  $\text{Fe}_{68.5}\text{Ni}_{19.1}\text{Si}_{4.9}\text{C}_{7.5}$  uchun  $T_K=764$  K,  $\text{Fe}_{70.5}\text{Ni}_{18.3}\text{Si}_{5.0}\text{C}_{6.2}$  uchun  $T_K=767$  K va  $\text{Fe}_{71.6}\text{Ni}_{18.7}\text{Si}_{5.0}\text{C}_{4.7}$  uchun  $T_K=770$  K qiymatga ega bo‘lib, bu temperaturalarda namunalarda II tur fazaviy o‘tish ferromagnetizm-paramagnetizm yuz beradi. Tahlillar ko‘rsatdiki, namunalar Xoll koeffitsiyentining temperaturaga  $R_H(T)$  bog‘liqligidan aniqlangan Kyuri temperaturalari shu namunalarning solishtirma elektr qarshiligini temperaturaga bog‘liqlik natijalaridan aniqlangan Kyuri temperaturalari bilan yetarlicha mos keladi. Tahlil natijalarini umumlashtirib, grafik ko‘rinishda quyidagicha tasvirlash mumkin.



**5-rasm.**  
**Fe-Ni-Si-C sistemasiga**  
**kiruvchi**  
**qotishmalarning Kyuri**  
**temperaturasi  $T_C$  va**  
**solishtirma elektr**  
**qarshiligi  $\rho_0$  ning**  
**metalloidlar (Si+C)**  
**konsentratsiyasiga**  
**bog‘liqligi**

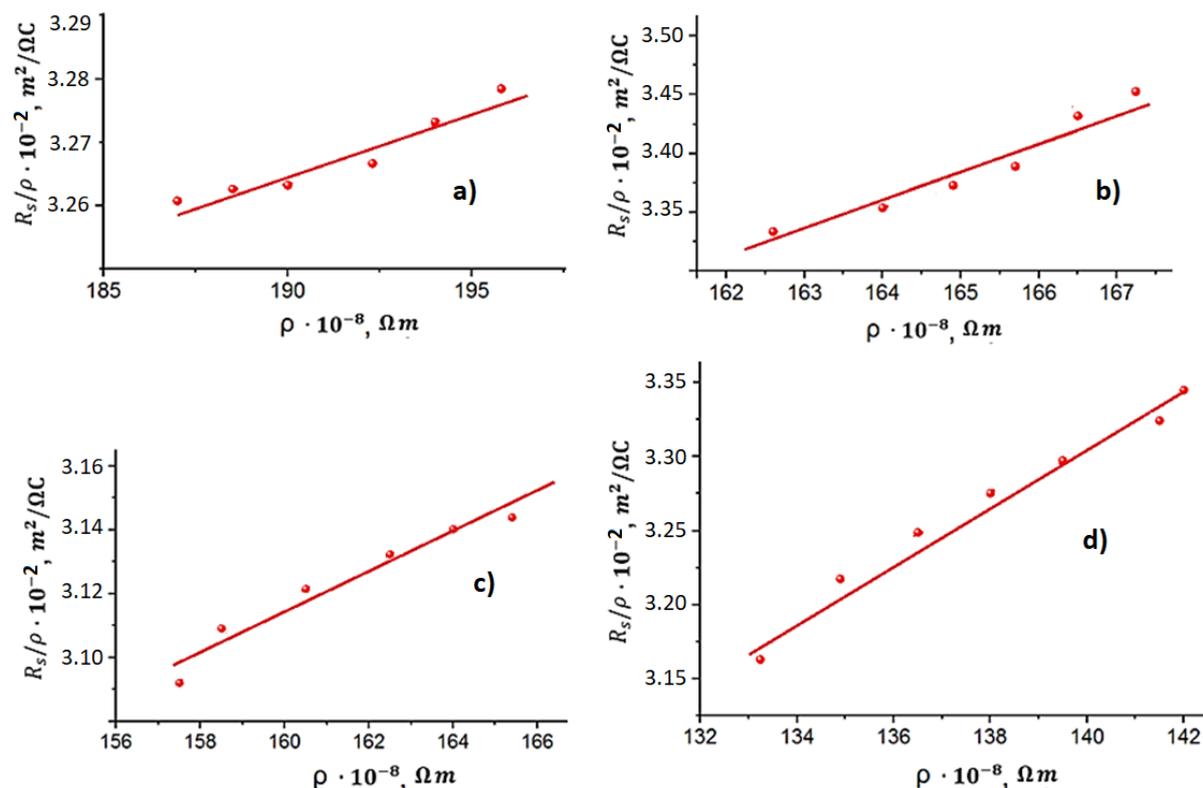
5-rasmdan ko‘rinadiki, Fe-Ni-Si-C sistemasiga kiruvchi qotishmalar tarkibida metalloidlar (Si+C) konsentratsiyasining oshishi bilan Kyuri temperaturasi  $T_C$  ning kamayishi kuzatiladi. O‘z navbatida, metalloidlar konsentratsiyasining oshishi va ferromagnit metallari konsentratsiyasining kamayishi namunada effektiv zaryad tashuvchilarning sonini kamaytiradi, bu esa solishtirma elektr qarshiligining mutlaq qiymatining oshishiga olib keladi.

$\rho(T)$  va  $R_S(T)$  ning temperaturaga bog‘liqligidan ma’lum temperatura oralig‘i ( $T < T_C$ ) da  $R_S/\rho$  va  $\rho$  o‘rtasida chiziqli bog‘liqlik kuzatildi, bu esa  $R_S = a\rho + b\rho^2$  ifodani tasdiqlaydi. Bu ifodadagi a va b koeffitsiyentlarining qiymatlari 2-jadvalda keltirilgan.

**2-jadval.**

| Namuna  | Harorat diapazoni, K | $a \cdot 10^{-3}, m^2/\Omega C$ | $b \cdot 10^{-5}, m/\Omega^2 C$ |
|---|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| $\text{Fe}_{67.3}\text{Ni}_{18.2}\text{Si}_{5.1}\text{C}_{9.4}$ | 300-550              | 19.8                            | 2.1                             |
| $\text{Fe}_{68.5}\text{Ni}_{19.1}\text{Si}_{4.9}\text{C}_{7.5}$ | 300-500              | 18.2                            | 6.3                             |
| $\text{Fe}_{70.5}\text{Ni}_{18.3}\text{Si}_{5.0}\text{C}_{6.2}$ | 300-550              | 17.4                            | 7.5                             |
| $\text{Fe}_{71.6}\text{Ni}_{18.7}\text{Si}_{5.0}\text{C}_{4.7}$ | 350-600              | 12.6                            | 13.5                            |

Anomal Xoll koefitsiyentining qiymati odatda yuqori metalloid tarkibiga ega bo'lgan qotishmalarda ancha katta bo'ladi. Bu, ehtimol, Xoll koefitsiyenti va amorf holatdagi qotishmalarning elektr qarshiligi o'rtasidagi bog'liqlikning bevosita natijasidir.



**6-rasm. Fe-Ni-Si-C sistemasi amorf qotishmalari uchun  $R_s/\rho$  ning  $\rho$  ga bog'liqligi: a)  $Fe_{67.3}Ni_{18.2}Si_{5.1}C_{9.4}$ ; b)  $Fe_{68.5}Ni_{19.1}Si_{4.9}C_{7.5}$ ; c)  $Fe_{70.5}Ni_{18.3}Si_{5.0}C_{6.2}$ ; d)  $Fe_{71.6}Ni_{18.7}Si_{5.0}C_{4.7}$**

Anomal Xoll koefitsiyenti  $R_s$  ning qiymati namuna strukturasi bog'liq bo'lib, to'liq vektor, psevdopotensial bilan aniqlanadi va qotishmalarning mikro tuzilishiga juda sezgir parameter hisoblanadi. Ferromagnit qotishmalarning amorf holati uchun  $R_s = a\rho + b\rho^2$  tenglamaning  $a$  va  $b$  koefitsiyentlari qiymatlaridagi farqlar amorf lanish paytida elektron spektrning qisman o'zgarishini ko'rsatadi, bu esa zaryad tashuvchilarning qisman lokallanishiga olib keladi.

Solishtirma elektr qarshiligi va Xoll koefitsiyentining temperaturaga bog'liqligi haqidagi ma'lumotlardan foydalanib, Fe-Ni-Si-C sistemasiga kiruvchi to'rtta ferromagnit amorf qotishmalarida effektiv spin-orbital o'zaro ta'siri  $\lambda_{so}$  parametri hisoblab chiqilgan. Bu parameter quyidagi formula yordamida hisoblanadi<sup>2</sup>.

$$R_s = \frac{2e^2}{\mu_0 \mu_B \hbar g} \rho^2 \lambda_{so} \quad (1)$$

bu yerda  $\mu_B = 0,927 \cdot 10^{-23}$  J/Tl – Bor magnitoni,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Gn/m – magnit doimiysi,  $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$  J·s – Plank doimiysi,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C –

<sup>2</sup> Trudeau M., Cochrane R. W., Baxter D. V., Strom-Olsen J. O. and Muir W. B. // Phys. Rev., v.37, N 9, 1988, p.4499-4502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.37.4499>

elektron zaryadi,  $\rho$  – solishtirma elektr qarshilik, o‘tkinchi metallari uchun  $g \approx 2$  Lande koeffitsiyenti,  $\lambda_{SO}$  - spin-orbital o‘zaro ta’sirining effektiv parametri.

(1) formuladan foydalanib,  $\lambda_{SO}$  topiladi. Hisoblash natijalari 3-jadvalda keltirilgan.

### 3-jadval

**Fe-Ni-Si-C sistemasidagi qotishmalarning ferromagnit holati uchun Xoll koeffitsiyenti  $R_H$ , solishtirma elektr qarshiligi  $\rho$  va effektiv spin-orbital o‘zaro ta’sirining parametri  $\lambda_{SO}$  qiymatlari**

|       | <i>Fe<sub>71.6</sub>Ni<sub>18.7</sub>Si<sub>5.0</sub>C<sub>4.7</sub></i> |                                  |                                      | <i>Fe<sub>70.5</sub>Ni<sub>18.3</sub>Si<sub>5.0</sub>C<sub>6.2</sub></i> |                                  |                                      |
|-------|--|----------------------------------|--------------------------------------|--|----------------------------------|--------------------------------------|
| T (K) | $R_H \cdot 10^{-8}$<br>$\left[\frac{m^3}{C}\right]$                      | $\rho \cdot 10^{-8}$<br>[Om · m] | $\lambda_{SO} \cdot 10^{-21}$<br>[J] | $R_H \cdot 10^{-8}$<br>$\left[\frac{m^3}{C}\right]$                      | $\rho \cdot 10^{-8}$<br>[Om · m] | $\lambda_{SO} \cdot 10^{-21}$<br>[J] |
| 300   | 6.05   | 134                              | 1.61                                 | 5.54   | 157                              | 1.07                                 |
| 350   | 6.1  | 136                              | 1.59                                 | 5.45   | 158                              | 1.04                                 |
| 400   | 6.2  | 137                              | 1.58                                 | 5.5  | 159                              | 1.04                                 |
| 450   | 6.25   | 138.5                            | 1.56                                 | 5.6  | 161                              | 1.03                                 |
| 500   | 6.3  | 140                              | 1.55                                 | 5.7  | 163                              | 1.02                                 |
| 550   | 6.4  | 141                              | 1.54                                 | 5.85   | 165                              | 1.02                                 |
| 600   | 6.46   | 142.5                            | 1.53                                 | 6  | 167                              | 1.03                                 |
| 650   | 6.55   | 144                              | 1.52                                 | 6.1  | 168.5                            | 1.02                                 |
| 700   | 6.65   | 145                              | 1.51                                 | 6.15   | 170                              | 1.02                                 |

|       | <i>Fe<sub>68.5</sub>Ni<sub>19.1</sub>Si<sub>4.9</sub>C<sub>7.5</sub></i> |                                  |                                      | <i>Fe<sub>67.3</sub>Ni<sub>18.2</sub>Si<sub>5.1</sub>C<sub>9.4</sub></i> |                                  |                                      |
|-------|--|----------------------------------|--------------------------------------|--|----------------------------------|--------------------------------------|
| T (K) | $R_H \cdot 10^{-8}$<br>$\left[\frac{m^3}{C}\right]$                      | $\rho \cdot 10^{-8}$<br>[Om · m] | $\lambda_{SO} \cdot 10^{-21}$<br>[J] | $R_H \cdot 10^{-8}$<br>$\left[\frac{m^3}{C}\right]$                      | $\rho \cdot 10^{-8}$<br>[Om · m] | $\lambda_{SO} \cdot 10^{-21}$<br>[J] |
| 300   | 4.82   | 161                              | 0.891                                | 4.3  | 186                              | 0.595                                |
| 350   | 4.9  | 162                              | 0.895                                | 4.4  | 187.5                            | 0.599                                |
| 400   | 5  | 163                              | 0.902                                | 4.47   | 189                              | 0.599                                |
| 450   | 5.05   | 164                              | 0.9                                  | 4.55   | 192                              | 0.591                                |
| 500   | 5.1  | 165.5                            | 0.892                                | 4.6  | 194                              | 0.585                                |
| 550   | 5.2  | 166.5                            | 0.899                                | 4.7  | 196                              | 0.586                                |
| 600   | 5.3  | 167.5                            | 0.9                                  | 4.75   | 197                              | 0.586                                |
| 650   | 5.35   | 168                              | 0.905                                | 4.8  | 197.5                            | 0.589                                |
| 700   | 5.4  | 169                              | 0.906                                | 4.83   | 199                              | 0.584                                |

3-jadvaldan ko‘rinib turibdiki, ferromagnit holatda effektiv spin-orbital o‘zaro ta’sirining parametri temperaturaga kuchsiz bog‘liq va temperatura oshishi bilan kamayadi. Bu shuni ko‘rsatadiki, ferromagnit holatda effektiv spin-orbital o‘zaro ta’siri  $\lambda_{SO}$  asosan o‘tkazuvchi elektronlarining spinlarda sochilishiga asoslangan.

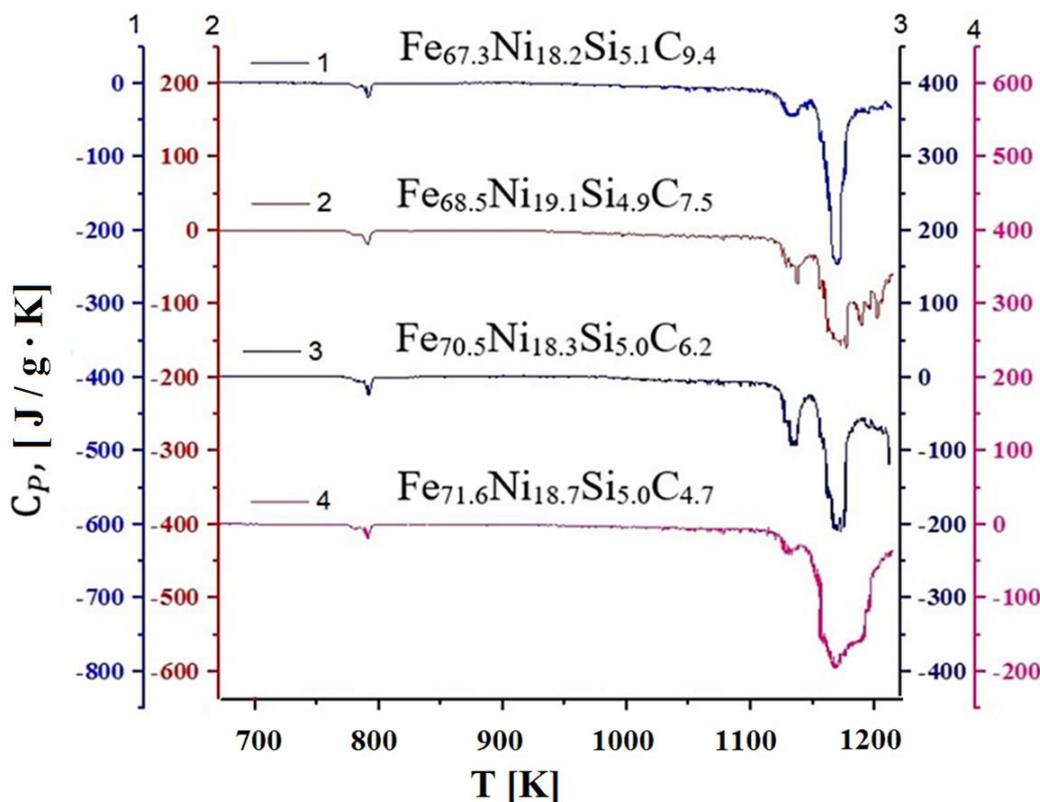
Fe-Ni-Si-C sistemasiga kiruvchi  $Fe_{67.3}Ni_{18.2}Si_{5.1}C_{9.4}$ ,  $Fe_{68.5}Ni_{19.1}Si_{4.9}C_{7.5}$ ,  $Fe_{70.5}Ni_{18.3}Si_{5.0}C_{6.2}$  va  $Fe_{71.6}Ni_{18.7}Si_{5.0}C_{4.7}$  amorf qotishmalar uchun kalorimetrik

tahlil o'tkazildi. Bu namunalarda massa, issiqlik oqimi va solishtirma issiqlik sig'iminining temperaturaga bog'liqligi xona temperaturasidan 1273 K temperatura oralig'ida eksperimental tadqiq qilindi.

O'rganilgan amorf qotishmalarning issiqlik sig'imiga temperaturaning ta'siri bo'yicha olingan eksperimental natijalar ularda yuzaga keladigan strukturaviy o'zgarishlarni aniqlash imkoni beradi. Amorf qotishmalarning issiqlik xossalari DSC yordamida aniqlandi. Tajribalar ko'rsatdiki, namunalar taxminan 770 K temperaturagacha termik barqarorligini saqlaydi, temperaturaning keyingi o'zgarishlarida namunalarda II-tur fazaviy ferromagnetizm-paramagnetizm o'tishi va kristall holatga o'tish kuzatildi. Strukturaviy o'zgarishlar DSC natijalarida faqat ikkita aniq belgilangan ekzotermik cho'qqilar kuzatildi ular mos ravishda Kyuri temperaturasi va kristallanish temperaturasini anglatadi, bu 770-790 K va 1120-1200 K temperaturalar oralig'ida kuzatildi.

Ushbu 1120-1200 K temperaturalar oralig'ida kuzatilgan minimumlarning paydo bo'lishi, ehtimol, to'liq kristallanish jarayonida yuzaga keladigan murakkab jarayonlar bilan bog'liq.

7-rasmda o'rganilayotgan amorf qotishmalar uchun doimiy bosimdagi ( $C_p$ , [J/g · K]) issiqlik sig'imining temperatura ( $T$ , [K]) ga bog'liqligi ko'rsatilgan.



**7-rasm. Fe-Ni-Si-C sistemasida amorf qotishmalarning solishtirma issiqlik sig'imi  $C_p$  ning temperaturaga bog'liqligi.**

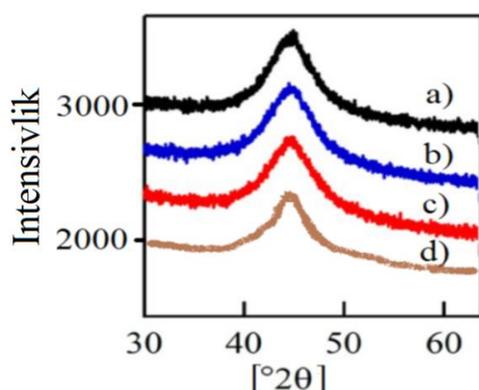
Fe-Ni-Si-C sistemasiga kiruvchi barcha o'rganilgan namunalar uchun  $\Delta H$ -entalpiyaning qiymatlari 4-jadvalda keltirilgan. Keltirilgan qiymatlar namunalar xona temperaturasidan 1200 K gacha qizdirilganda issiqlik effekti va kristallangan qismi hajmini ifodalaydi.

Fe-Ni-Si-C sistemasi qotishmalarining  $\Delta H$  –entalpiya o‘zgarishi qiymatlari

| Namuna   | Issiqlik effekti<br>$\Delta H_1$<br>[J/g]<br>(770 - 805 K) | Issiqlik effekti<br>$\Delta H_2(\text{umumiy})$<br>[J/g]<br>(920 – 1200 K) | Issiqlik effekti<br>$\Delta H_2(\text{am+kr})$<br>[J/g]<br>(920 – 1140 K) | $V_{\text{frak}}$ ,<br>% |
|--|--|--|---|--------------------------|
| Fe <sub>67.3</sub> Ni <sub>18.2</sub> Si <sub>5.1</sub> C <sub>9.4</sub> | -128.2   | -11580.5   | -1277   | 88                       |
| Fe <sub>68.5</sub> Ni <sub>19.1</sub> Si <sub>4.9</sub> C <sub>7.5</sub> | -164.2   | -14058.4   | -1636.8   | 88                       |
| Fe <sub>70.5</sub> Ni <sub>18.3</sub> Si <sub>5.0</sub> C <sub>6.2</sub> | -151.4   | -15855.0   | -1295   | 91                       |
| Fe <sub>71.6</sub> Ni <sub>18.7</sub> Si <sub>5.0</sub> C <sub>4.7</sub> | -143.1   | -11848.3   | -1194.5   | 90                       |

7-rasmda tasvirlangan tajriba natijalari shuni ko‘rsatadiki, 770 K temperaturagacha namunalar sezilarli issiqlik effektini keltirib chiqaradigan hech qanday fazali o‘zgarishlarga duch kelmaydi, 770 K temperaturada birinchi issiqlik effekti kuzatiladi, u 805 K temperaturagacha davom etadi. 900 K dan boshlab solishtirma issiqlik sig‘imining qiymati kamayib borib, 1100 K da keskin kamayishi kuzatildi. Ushbu issiqlik effekti namuna tarkibida nanokristallik strukturalarining hosil bo‘lishini izohlaydi. Shundan so‘ng, 1140 K da keyingi issiqlik effekti kuzatiladi, namuna to‘liq kristall holatga o‘tadi. Bu 1140 – 1200 K temperatura oralig‘ida sodir bo‘ladi. Birinchi issiqlik effekti qotishmaning amorf holatda nanokristall sohalarining paydo bo‘lishi vaqtidagi issiqlikning yutilishiga to‘g‘ri keladi, ikkinchi issiqlik effekti qayta kristallanish tipidagi fazaviy o‘tish paytida issiqlikning yutilishiga to‘g‘ri keladi.

Dissertatsiyaning to‘rtinchi bobi “Fe-Cr-B sistemasiga kiruvchi amorf qotishmalarning elektr, galvanomagnet, magnit va issiqlik xossalari hamda ularning tahlili” deb nomlangan bo‘lib, bunda o‘rganilayotgan namunalarning tuzilishi va holati haqida ma‘lumot olish uchun «Panalytical Empyrean» rentgen difraktometrida rengenofazaviy tahlili olindi.



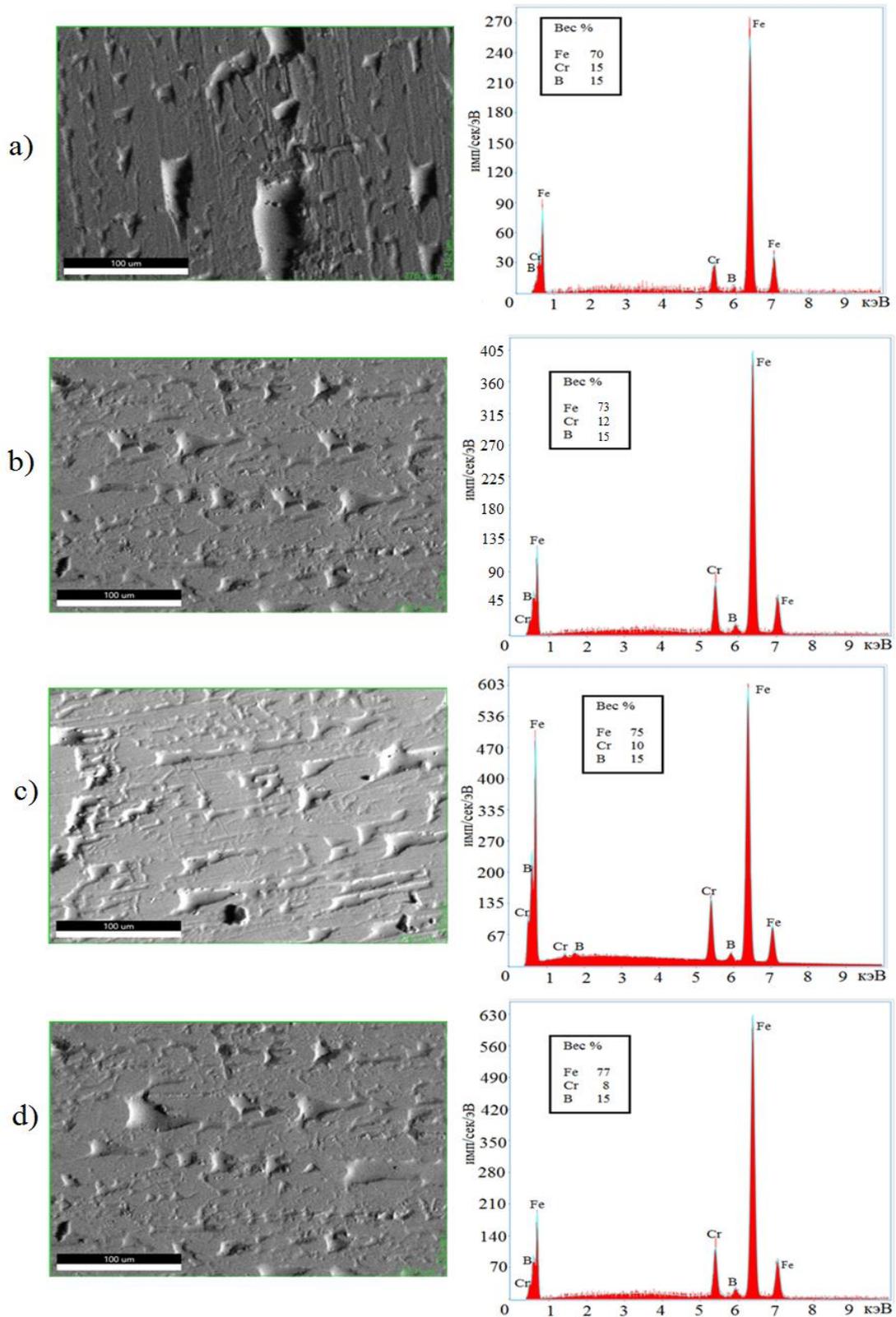
8-rasm. «Panalytical Empyrean» rentgen difraktometrida olingan amorf metall qotishmalarining rentgen spektri:

a) Fe<sub>70</sub>Cr<sub>15</sub>B<sub>15</sub>, b) Fe<sub>73</sub>Cr<sub>12</sub>B<sub>15</sub>,  
c) Fe<sub>75</sub>Cr<sub>10</sub>B<sub>15</sub> va d) Fe<sub>77</sub>Cr<sub>8</sub>B<sub>15</sub>

8-rasmning tahlili ko‘rsatadiki, o‘rganilgan namunalar XRD spektrida kristalli fazalarga mos keladigan keskin diffraksiya cho‘qqilari kuzatilmadi, bu barcha namunalar amorf holatda ekanligini tasdiqlaydi. Diffraksiya spektrlari taxminan 45° burchakda amorf qotishmalarga xos bo‘lgan keng burchakli cho‘qqilarni ko‘rsatdi.

Fe-Cr-B sistemasiga kiruvchi amorf qotishmalarning elementlar tarkibi o‘rtasidagi muvofiqlikni aniqlash uchun SEM - EVO MA 10 (Zeiss, Germany)

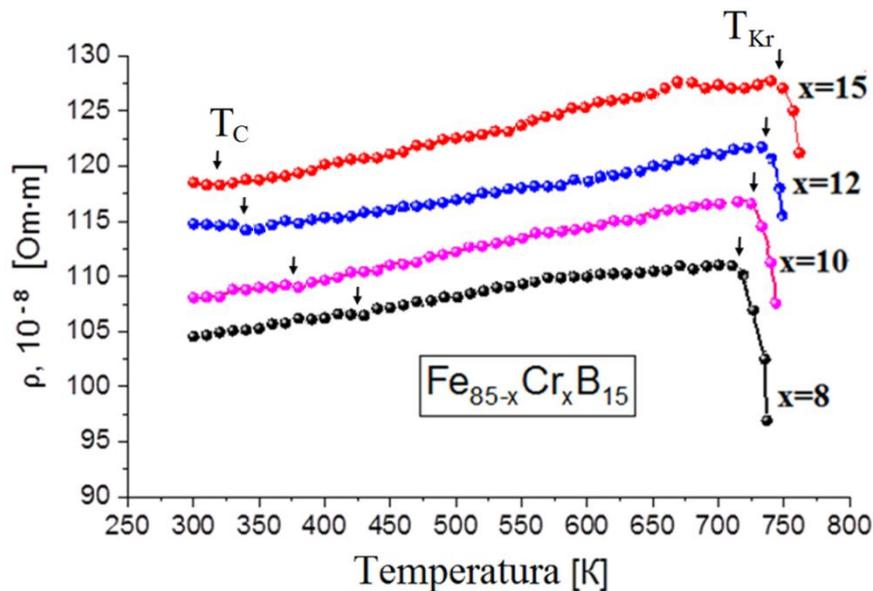
skanerlash elektron mikroskopi yordamida namunalar 100  $\mu\text{m}$  o'lchamdagi tasvirlari va o'rganilayotgan namunaning elementlar tarkibining miqdoriy tahlili eksperimental ravishda olindi va buning tasvirlari quyidagi 9-rasmدا keltirilgan.



**9-rasm. Skanerlovchi elektron mikroskop (SEM) yordamida FeCrB sistemasiga kiruvchi amorf qotishmalarning elementlar tarkibi tasvirlari: a)  $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ , b)  $\text{Fe}_{73}\text{Cr}_{12}\text{B}_{15}$ , c)  $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{10}\text{B}_{15}$  va d)  $\text{Fe}_{77}\text{Cr}_8\text{B}_{15}$**

9-rasmda skanerlovchi elektron mikroskop (SEM) yordamida olingan namunalarning mikrostrukturaviy tasviri va ularning energiya dispersiyali rentgen spektroskopiyasi (EDX) natijalari keltirilgan. 9-rasmdagi har bir grafikda gorizontal o'qda energiya va vertikal o'qda esa intensivlik ko'rsatilgan. Olingan spektrlardan ko'rishimiz mumkinki, grafiklarda uchta asosiy element Fe (temir), Cr (xrom) va B (bor) larning miqdoriy ulushlari keltirilgan: Tahlillar ko'rsatadiki, elektron mikroskop (SEM) va energiya dispersiyali rentgen spektroskopiyasi (EDX) natijalari ishlab chiqaruvchilar tomonidan berilgan namuna tarkibidagi elementlarning miqdoriy ulushlari to'g'risidagi ma'lumotlarini to'la tasdiqlaydi.

Amorf holatdagi Fe-Cr-B sistemasiga kiruvchi qotishmalarning solishtirma elektr qarshiligining temperaturaga bog'liqligi 10 - rasmda tasvirlangan.



### 10-rasm. Fe-Cr-B sistemasiga kiruvchi qotishmalarning solishtirma elektr qarshiligining temperaturaga bog'liqligi

10-rasmdan ko'rinadiki, barcha namunalar uchun solishtirma elektr qarshilik temperaturadan kuchsiz bog'langan. O'rganilgan amorf metall qotishmalarning deyarli barchasida solishtirma elektr qarshilik  $\rho$  xona temperaturasidan kristallanish temperaturasigacha monoton oshib boradi va qarshilikning temperatura koeffitsiyenti QTK -  $\partial\rho/\partial T$  esa quyidagicha bo'ladi:

$\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$  qotishma uchun  $\frac{\partial\rho}{\partial T} = 2,62 \cdot 10^{-2} \frac{\mu\text{Om}\cdot\text{sm}}{\text{K}}$ ,  $\text{Fe}_{73}\text{Cr}_{12}\text{B}_{15}$  amorf qotishma

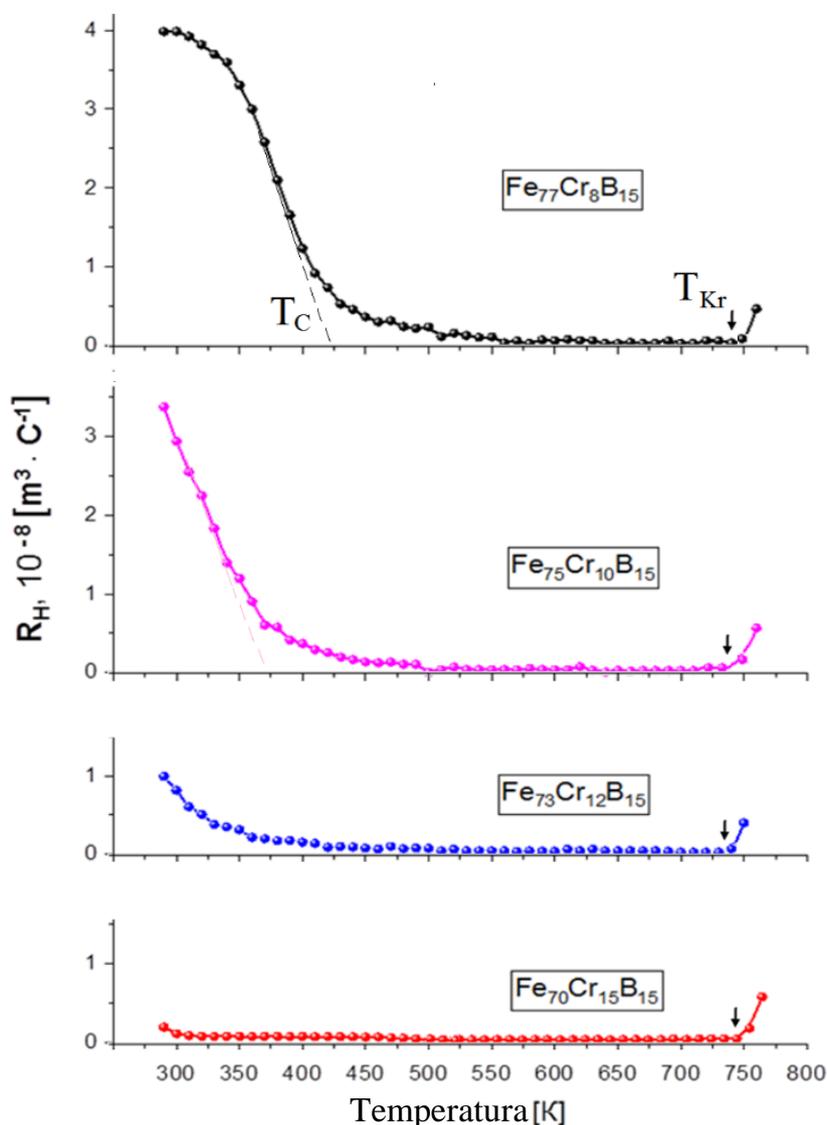
uchun  $\frac{\partial\rho}{\partial T} = 2,45 \cdot 10^{-2} \frac{\mu\text{Om}\cdot\text{sm}}{\text{K}}$ ,  $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{10}\text{B}_{15}$  namuna uchun

$\frac{\partial\rho}{\partial T} = 2,23 \cdot 10^{-2} \frac{\mu\text{Om}\cdot\text{sm}}{\text{K}}$  bo'lsa,  $\text{Fe}_{77}\text{Cr}_8\text{B}_{15}$  namuna uchun esa

$\frac{\partial\rho}{\partial T} = 1,89 \cdot 10^{-2} \frac{\mu\text{Om}\cdot\text{sm}}{\text{K}}$  qiymatlarni, solishtirma elektr qarshilikning xona temperaturasidagi boshlang'ich qiymati esa mos ravishda  $104 \cdot 10^{-8} \text{Om}\cdot\text{m}$ ,  $108 \cdot 10^{-8} \text{Om}\cdot\text{m}$ ,  $115 \cdot 10^{-8} \text{Om}\cdot\text{m}$  va  $118 \cdot 10^{-8} \text{Om}\cdot\text{m}$  ni tashkil etadi.

Van der Pau usuli yordamida Fe-Cr-B amorf qotishmalarning Xoll koeffitsiyenti  $R_H$  ning temperatura  $T$  ga bog'liqligi quyidagi 11 - rasmda tasvirlangan.

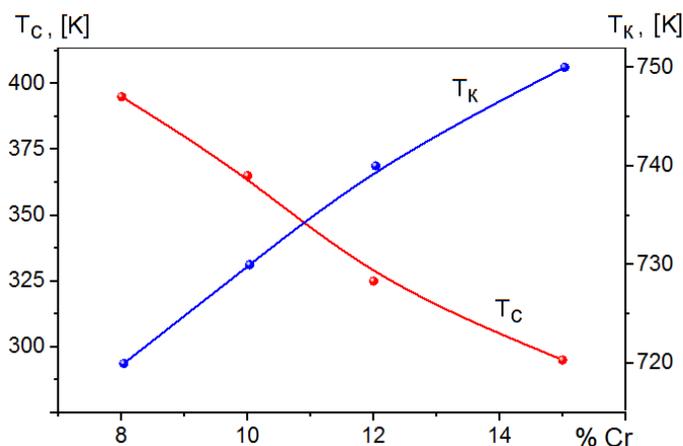
Rasmdan ko‘rinadiki,  $\text{Fe}_{77}\text{Cr}_8\text{B}_{15}$  amorf qotishmada Xoll koeffitsiyenti xona temperaturasidan 420 K gacha chiziqli kamayadi. Temperaturaning keyingi 420-500 K intervalida monoton kamayib, nol qiymatga cheksiz yaqinlashadi, bu amorf qotishmaning ferromagnit holatdan paramagnit holatga o‘tishi bilan bog‘liq deb tushutirish mumkin.  $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{10}\text{B}_{15}$  namunasida esa, Xoll koeffitsiyenti xona temperaturasidan 370 K gacha keskin qamayadi. Temperaturaning keyingi 370-475K intervalida chiziqli kamayib, nol qiymatga cheksiz yaqinlashadi, huddi shu holat  $\text{Fe}_{73}\text{Cr}_{12}\text{B}_{15}$  va  $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$  namunalarda ham kuzatiladi.



**11-rasm. Fe-Cr-B sistemasiga kiruvchi qotishmalarning Xoll koeffitsiyenti  $R_H$  ning T temperaturaga bog‘liqligi**

Xoll koeffitsiyentini xona temperaturasidan boshlab chiziqli kamayishi grafigini ekstrapolyatsiya usulida davom ettirib,  $\text{Fe}_{77}\text{Cr}_8\text{B}_{15}$  namunasi uchun Kyuri temperaturasi 425 K ekanligini aniqlash mumkin. Xoll koeffitsiyentining temperaturaga bog‘liqlik grafigidan ko‘rinadiki,  $T=720\text{K}$  temperaturadan boshlab, Xoll koeffitsiyenti  $R_H$  ning oshishi kuzatiladi. Bu temperaturadan boshlab, namunada kristallanish kuzatiladi. Xuddi shunday tendensiya  $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{10}\text{B}_{15}$

namunada ham kuzatiladi. Bu namuna uchun amorf holatning Kyuri temperaturasi 375 K, kristallanish temperaturasi 730 K,  $\text{Fe}_{73}\text{Cr}_{12}\text{B}_{15}$  namuna uchun amorf holatning Kyuri temperaturasi 335 K, kristallanish temperaturasi 740 K va  $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$  namuna uchun amorf holatning Kyuri temperaturasi 320 K, kristallanish temperaturasi 750 K ekanligi aniqlandi. Tahlil natijalarini umumlashtirib, grafik ko‘rinishda quyidagicha tasvirlash mumkin (12-rasm).



**12-rasm.  $\text{Fe}_{85-x}\text{Cr}_x\text{B}_{15}$  ( $x=8\div 15$ ) sistemasiga kiruvchi qotishmalarning kristallanish temperaturasi  $T_K$  va Kyuri temperaturasi  $T_C$  ning Cr konsentratsiyasiga bog‘liqligi**

12-rasmdan ko‘rinadiki, Fe-Cr-B sistemasiga kiruvchi qotishmalar tarkibida Cr-xrom konsentratsiyasining oshishi bilan Kyuri temperaturasi  $T_C$  ning kamayishi, kristallanish temperaturasi  $T_K$  ning esa oshishi kuzatiladi.

Amorf metal qotishmalarda metalloidlarning konsentratsiyasini oshishi birinchidan, tok tashuvchilarning effektiv sonini kamayishiga ikkinchidan, sochilish potensialini oshishiga sababchi bo‘ladi. Buning natijasida metalloidlarning konsentratsiyasini oshishi bilan amorf qotishmalarning kristallanish temperaturasi oshadi.

Ikkinchi tomondan, amorf ferromagnit qotishmalarda noferromagnit metallarning konsentratsiyasi oshishi bilan Kyuri temperaturasi pasayishini ko‘rish mumkin.

Amorf qotishmalarning Kyuri temperaturasi va kristallanish temperaturasi metalloidlarning konsentratsiyasiga bog‘liq bo‘ladi. O‘rganilgan nanunalarining Kyuri temperaturasi va kristallanish temperaturasining tajribaviy natijalari 5-jadvalda keltirilgan.

**5-jadval**

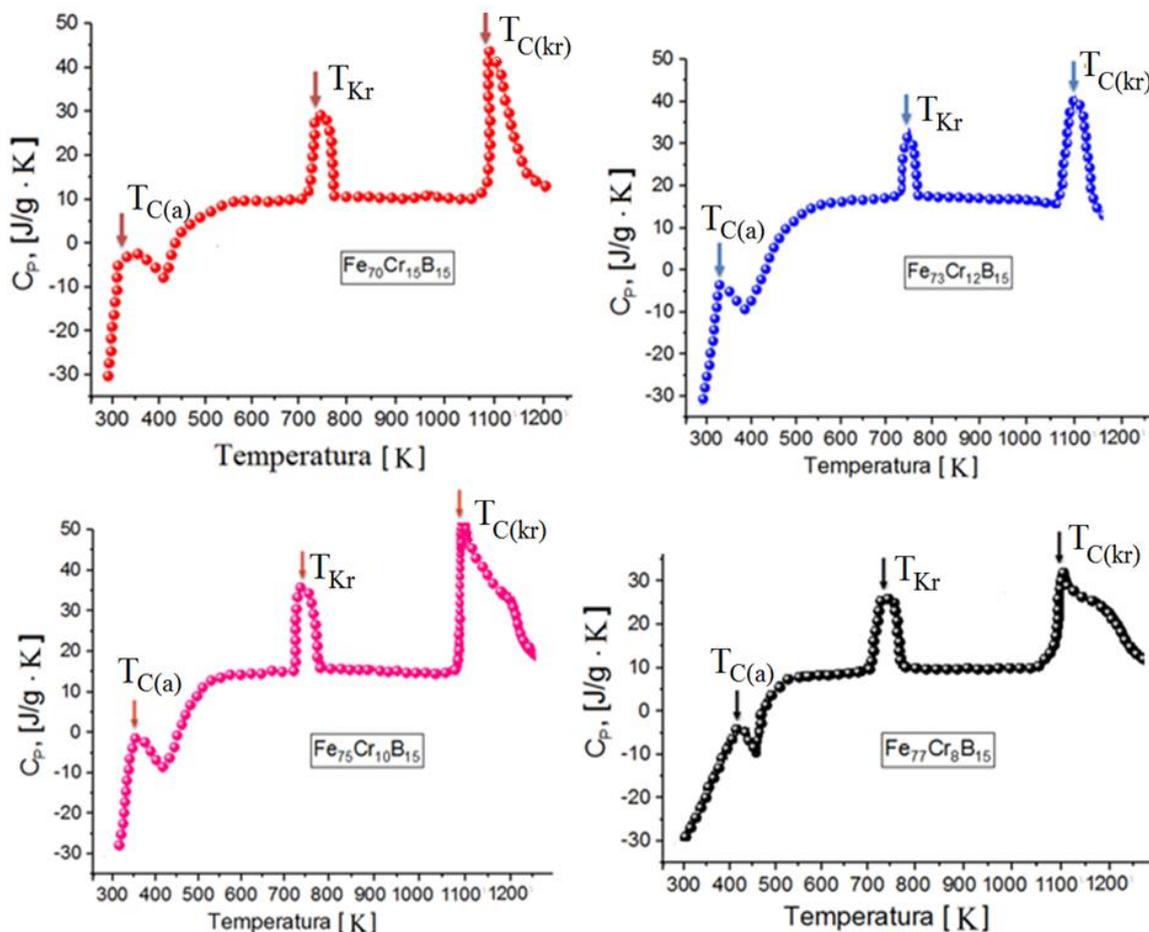
**Fe-Cr-B sistemasiga kiruvchi qotishmalarning Kyuri va kristallanish temperaturasi natijalari**

| Parametr                                | Tarkibga qarab parametr qiymati             |   |   |  |
|---|---|---|---|--|
|   | $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ | $\text{Fe}_{73}\text{Cr}_{12}\text{B}_{15}$ | $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{10}\text{B}_{15}$ | $\text{Fe}_{77}\text{Cr}_8\text{B}_{15}$ |
| Kyuri temperaturasi $T_C$ , [K]:        | 295   | 325   | 375   | 425                                      |
| Kristallanish temperaturasi $T_K$ , [K] | 750   | 740   | 730   | 720                                      |

Amorf qotishmalar tez sovitish natijasida atomlar joyashuvi betartib holda shakllanadi. Qizdirish jarayonida bu ichki tartibsizliklar bartaraf bo‘ladi, natijada

issiqlik chiqariladi va grafikda yuqoriga yoʻnalgan pik (choʻqqi) kuzatiladi. Bu hodisa ayniqsa, qattiq fazadagi tarkibiy oʻzgarishlarga bogʻliq.

Fe-Cr-B sistemasiga kiruvchi  $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$ ,  $Fe_{73}Cr_{12}B_{15}$ ,  $Fe_{75}Cr_{10}B_{15}$  va  $Fe_{77}Cr_{8}B_{15}$  amorf qotishmalarning solishtirma issiqlik sigʻimi  $C_p$  ning temperaturaga bogʻliqligi 13-rasmda tasvirlangan. Oʻlchashlar barcha namunalar uchun xona temperaturasidan 1300 K gacha temperatura oraligʻida amalga oshirilgan.



**13-rasm. Fe-Cr-B sistemasiga kiruvchi amorf qotishmalar solishtirma issiqlik sigʻimi  $C_p$  ning temperaturaga bogʻliqligi**

13-rasmda keltirilgan natijalardan foydalanib, egri chiziqlar bilan chegaralangan maydonlarni raqamli integrallash usuli yordamida issiqlik effektlari, yaʼni entalpiyadagi oʻzgarishlar hisoblanadi. Barcha oʻrganilgan namunalar uchun issiqlik effektlarining qiymatlari 6-jadvalda keltirilgan.

Oʻrganilgan namunalarda solishtirma issiqlik sigʻimining temperaturaga bogʻliqligi natijalaridagi issiqlik effekti kuzatilgan oʻzgarishlar entalpiyaning oʻzgarishini namoyon qiladi.

13-rasmda tasvirlangan tajriba natijalari shuni koʻrsatadiki, 298-430 K temperaturada birinchi issiqlik effekti kuzatiladi va solishtirma issiqlik sigʻimi  $C_p$  ning qiymati keskin oshishi kuzatildi. Bu Fe-Cr-B sistemasiga kiruvchi namunalarning solishtirma elektr qarshiligi, solishtirma magnitlanish, Xoll koeffitsiyentining temperaturaga bogʻliqlik grafiklarida kuzatilgan Kyuri

temperaturasi qiymatlariga mos keladi. Temperaturaning keyingi qiymatlarida solishtirma issiqlik sig'imi monoton oshib, 500 K ga yetganda termik barqarorligini saqlaydi. 700 – 770 K temperatura oralig'ida solishtirma issiqlik sig'imi  $C_p$  ning qiymati oshib, boshqa xossalarda kuzatilgan kristallanish temperaturasiga mos keluvchi pik kuzatildi. Ushbu issiqlik effekti kristallanish turining birinchi darajali fazaviy o'tishga mos keladi. Keyingi issiqlik effekti 1100 - 1300 K temperatura oralig'ida sodir bo'ladi. Bu Fe-Cr-B sistemasiga kiruvchi namunalarning solishtirma magnitlanishning temperaturaga bog'liqlik grafiklarida kuzatilgan kristall holatning Kyuri temperaturasi qiymatlariga mos keladi.

### 6-jadval

#### Fe-Cr-B sistemasi qotishmalarining $\Delta H$ –entalpiya o'zgarishi qiymatlari

| Namuna  | Issiqlik effekti                       | Issiqlik effekti                       | Issiqlik effekti                         |
|---|--|--|--|
|   | $\Delta H_1$<br>[J/g]<br>(295 - 430 K) | $\Delta H_2$<br>[J/g]<br>(700 – 770 K) | $\Delta H_3$<br>[J/g]<br>(1100 - 1300 K) |
| Fe <sub>70</sub> Cr <sub>15</sub> B <sub>15</sub> | 447                                    | 674                                    | 3009                                     |
| Fe <sub>73</sub> Cr <sub>12</sub> B <sub>15</sub> | 571                                    | 791                                    | 4616                                     |
| Fe <sub>75</sub> Cr <sub>10</sub> B <sub>15</sub> | 668                                    | 870                                    | 5219                                     |
| Fe <sub>77</sub> Cr <sub>8</sub> B <sub>15</sub>  | 796                                    | 922                                    | 5658                                     |

Solishtirma elektr qarshilik  $\rho$  va Xoll koeffitsiyenti  $R_H$  ning temperaturaga bog'liqligi natijalaridan foydalanib, (1) formula yordamida Fe-Cr-B sistemasi ferromagnit amorf qotishmalarida effektiv spin-orbital o'zaro ta'siri  $\lambda_{SO}$  parametri hisoblab chiqildi. Hisoblash natijalari 7-jadvalda keltirilgan

### 7-jadval

#### Fe-Cr-B sistemasidagi qotishmalarning ferromagnit holati uchun Xoll koeffitsiyenti $R_H$ , solishtirma elektr qarshiligi $\rho$ va effektiv spin-orbital o'zaro ta'sirining parametri $\lambda_{SO}$ qiymatlari

| T (K) | Fe <sub>77</sub> Cr <sub>8</sub> B <sub>15</sub> |  |                                      | Fe <sub>75</sub> Cr <sub>10</sub> B <sub>15</sub> |  |                                      |
|-------|--|--|--------------------------------------|---|--|--------------------------------------|
|       | $R_H \cdot 10^{-8}$<br>[ $\frac{m^3}{C}$ ]       | $\rho \cdot 10^{-8}$<br>[ $Om \cdot m$ ] | $\lambda_{SO} \cdot 10^{-14}$<br>[J] | $R_H \cdot 10^{-8}$<br>[ $\frac{m^3}{C}$ ]        | $\rho \cdot 10^{-8}$<br>[ $Om \cdot m$ ] | $\lambda_{SO} \cdot 10^{-14}$<br>[J] |
| 300   | 4  | 104                                      | 17.7                                 | 3   | 108                                      | 12.3                                 |
| 320   | 3.8  | 104.5                                    | 16.6                                 | 2.2   | 108.2                                    | 9                                    |
| 340   | 3.5  | 105                                      | 15.2                                 | 1.4   | 108.5                                    | 5.7                                  |
| 360   | 3  | 105.5                                    | 13                                   | 0.9   | 109                                      | 3.63                                 |
| 380   | 2.1  | 106                                      | 8.6                                  | 0.5   | 109.3                                    | 2                                    |
| 400   | 1.2  | 106                                      | 5.1                                  |   |  |                                      |
| 420   | 0.7  | 106.5                                    | 2.9                                  |   |  |                                      |
| 440   | 0.4  | 107                                      | 1.6                                  |   |  |                                      |

|       | Fe <sub>73</sub> Cr <sub>12</sub> B <sub>15</sub> |                                  |                                      | Fe <sub>70</sub> Cr <sub>15</sub> B <sub>15</sub> |                                  |                                      |
|-------|---|----------------------------------|--------------------------------------|---|----------------------------------|--------------------------------------|
| T (K) | $R_H \cdot 10^{-8}$<br>[ $\frac{m^3}{C}$ ]        | $\rho \cdot 10^{-8}$<br>[Om · m] | $\lambda_{SO} \cdot 10^{-14}$<br>[J] | $R_H \cdot 10^{-8}$<br>[ $\frac{m^3}{C}$ ]        | $\rho \cdot 10^{-8}$<br>[Om · m] | $\lambda_{SO} \cdot 10^{-14}$<br>[J] |
| 300   | 0.8   | 114.8                            | 2.9                                  | 0.16  | 118.5                            | 0.54                                 |
| 320   | 0.5   | 114.85                           | 1.8                                  | 0.12  | 118.7                            | 0.4                                  |
| 340   | 0.35  | 114.9                            | 1.2                                  | 0.1   | 119                              | 0.33                                 |
| 360   | 0.1   | 115                              | 0.72                                 |   |                                  |                                      |

7-jadvaldan ko‘rinib turibdiki, ferromagnit holatda effektiv spin-orbital o‘zaro ta‘sirining parametri temperaturaga kuchsiz bog‘liq va temperatura oshishi bilan kamayadi. Bu shuni ko‘rsatadiki, ferromagnit holatda effektiv spin-orbital o‘zaro ta‘siri  $\lambda_{SO}$  parametri asosan o‘tkazuvchanlik elektronlarining spinlarda sochilishiga asoslanadi.

## XULOSA

Dissertatsiyada olib borilgan natijalarni umumlashtirib, quyidagicha xulosa qilish mumkin.

1. O‘rganilgan Fe-Ni-Si-C va Fe-Cr-B sistemasiga kiruvchi amorf qotishmalarining elektr qarshiligi, Xoll koeffitsiyenti va solishtirma issiqlik sig‘imini temperaturaga bog‘liqligi namunalarning amorf holatidan kristall holatga o‘tish chegarasigacha eksperimental tadqiq qilindi.

2. Fe-Ni-Si-C sistemasida metalloidlar (Si+C)ning namunalarda strukturasi, termik stabiligiga va kinetik xossalriga ta‘siri o‘rganildi. Tajribalar ko‘rsatdiki, o‘rganilgan amorf metallar tarkibida metalloidlarning konsentratsiyasi oshishi bilan Xoll koeffitsiyentining effektiv qiymati va kristallanish temperaturasini oshishi, Kyuri temperaturasini esa kamayishi aniqlandi.

3. Metalloidlar konsentratsiyasining o‘zgarishi amorf qotishmalarining magnit xususiyatlariga ham ta‘sir qiladi, ya‘ni Fe-Cr-B amorf qotishmalarida Cr konsentratsiyasining oshishi bilan, magnitlanishning absolyut qiymati va Kyuri temperaturasi pasayadi, kristallanish temperaturasi esa oshadi. Qizdirish tezligining oshishi esa Kyuri temperaturasiga ta‘sir etmaydi, ammo kristallanish temperaturasining boshlanishi va tugallanishi intervalini oshiradi.

4. Namunalarda metalloidlar konsentratsiyasini oshishi bilan, solishtirma elektr qarshiligining absolyut qiymati oshishi, qarshilikning temperatura koeffitsiyenti esa kamayishi kuzatildi. Metalloidlar konsentratsiyasining oshishi namunalarda tok tashuvchilar sonining effektiv qiymatini kamaytiradi va qarshilik oshadi. Muidji kriteriyasiga mos keluvchi qarshilikning oshishi uning temperatura koeffitsiyentining kamayishiga olib keladi.

5.  $T < T_c$  sohada amorf qotishmalar uchun  $R_s = \alpha\rho + b\rho^2$  ( $\rho$  – solishtirma elektr qarshiligi) bog‘liqlik qanoatlantirilishi ko‘rsatilgan, bu esa Vedyayev va Granovskiylarning nazariyasi amorf qotishmalar uchun ham o‘rinli ekanligini tasdiqlaydi.

6. Fe-Ni-Si-C hamda Fe-Cr-B sistemasiga kiruvchi amorf qotishmalarning issiqlik sigimining temperaturaga bog‘liqligi orqali aniqlangan Kyuri  $T_C$  va kristallanish temperatura  $T_K$  larinig qiymatlari solishtirma elektr qarshilik va Xoll koeffitsiyentining temperaturaga bog‘liqligi orqali aniqlangan qiymatlariga yetarlicha mos kelishi aniqlandi. Shuningdek, solishtirma issiqlik sig‘imi  $C_p(T)$  ning temperaturaga bog‘liqligidan namunalarda paydo bo‘luvchi issiqlik effekti-entalpiyaning o‘zgarishi aniqlandi. Amorf holatdan kristall holatga o‘tishda namunalarda nanokristall sohalarning vujudga kelishi tushuntirilgan.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/30.12.2019.FM.02.04 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ПРИ САМАРКАНДСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ  
УНИВЕРСИТЕТЕ ИМЕНИ ШАРОФА РАШИДОВА**

---

**САМАРКАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
ШАРОФА РАШИДОВА**

**ХОМИТОВ ШЕРЗОД АСАТИЛЛО УГЛИ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ, МАГНИТНЫХ И  
ТЕРМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ПЕРЕХОДНЫХ  
3d МЕТАЛЛОВ**

**01.04.09 - Физика магнитных явлений**

**АВТОРЕФЕРАТ**

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

**Самарканд – 2025**

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за № В2024.4.PhD/FM1203.

Диссертация выполнена в Самаркандском государственном университете имени Шарофа Рашидова.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета ([www.samdu.uz](http://www.samdu.uz)) и на информационно-образовательном портале «Ziyonet» ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

**Научный руководитель:** **Ражабов Рустам Мустафоевич**  
кандидат физико-математических наук, доцент

**Официальные оппоненты:** **Шарипов Мирзо Зокирович**  
доктор физико-математических наук, профессор  
**Усаров Уктам Туратович**  
кандидат физико-математических наук, профессор

**Ведущая организация:** **Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова**

Защита диссертации состоится «12» 06 2025 г. в 11<sup>30</sup> часов на заседании ученого совета PhD.03/30.12.2019.FM.02.04 при Самаркандском государственном университете. (Адрес: 140104, г. Самарканд, Университетский проспект, 15. Тел.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; факс: (99866) 239-11-40; e-mail: [rektor@samdu.uz](mailto:rektor@samdu.uz) Институт Инженерной физики Самаркандского государственного университета имени Шарофа Рашидова, 1-этаж, 114-аудитория).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Самаркандского государственного университета (зарегистрирована под № 46). Адрес: 140104, г. Самарканд, Университетский проспект, 15. Тел.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; факс: (99866) 239-11-40.

Автореферат диссертации разослан «21» 05 2025 г.  
(протокол рассылки № 46 от «21» 05 2025 г.)



**М.Х.Ашуров**  
Председатель научного совета  
по присуждению ученых степеней,  
д.ф.-м.н., академик

**Р.М.Ражабов**  
Ученый секретарь научного совета  
по присуждению ученых степеней,  
к.ф.-м.н., доцент

**Д.И.Семенов**  
Председатель научного семинара при научном  
совете по присуждению ученых степеней,  
д.ф.-м.н., доцент

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

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** Бурное развитие науки и техники в современном мире ставит на повестку дня решение большого числа проблемных исследований электрических, магнитных, гальваномагнитных и тепловых свойств металлов и сплавов. На сегодняшний день изучение физических свойств и внутренней структуры аморфных ферромагнитных сплавов на основе 3d-металлов является актуальной задачей. Влияние температуры на металлы и их сплавы дает важную информацию об их структурных и объемных изменениях, а также о процессе плавления. Это имеет практическое значение в машиностроении, термической обработке металлов, инженерных расчетах. Изучение физических свойств аморфных металлических сплавов позволяет получить информацию о составе и физических свойствах этих сплавов в жидком состоянии. Эти свойства служат для анализа теории атомно-неупорядоченных сплавов, что важно для физики твердых и жидких металлов, материаловедения и металлургической промышленности.

Результаты многочисленных исследований, проведенных во всем мире, свидетельствуют о том, что жаростойкость металлических систем зависит от их индивидуальных свойств: электронной структуры, межатомных связей, характеризующих температуру плавления, модуля упругости и характеристической температуры. Решение таких задач достигалось путем комплексного изучения электропроводности, магнитных и гальваномагнитных свойств, а также тепловых свойств металлов. Материалы из сплавов на основе 3d-металлов благодаря своим магнитным свойствам применяются при изготовлении высокоэнергетических постоянных магнитов, в запоминающих устройствах, а также в качестве магнитомягких материалов для сердечников малогабаритных трансформаторов. Углубленное изучение вышеуказанных физических свойств с целью дальнейшего расширения области их применения остается актуальной задачей и сегодня.

В нашей стране уделяется большое внимание практическому развитию фундаментальных наук, в том числе изучению физических явлений, происходящих в сплавах на основе переходных металлов, которые широко используются в промышленности. Изучение физических свойств аморфных металлических сплавов напрямую связано с их практическим применением. В современном технологически развитом мире спрос на магнитные материалы, используемые в электронных технологиях, растет с каждым днем. Особую роль в этом играют аморфные металлические сплавы, которые широко применяются в электронной технике. Поэтому одной из актуальных задач является изучение изменения электрических, магнитных, гальваномагнитных и тепловых свойств таких сплавов в зависимости от концентрации металлоидов и температуры.

Данное диссертационное исследование основано на Указе Президента Республики Узбекистан от 8 октября 2019 г. № ПФ-5847 “Об утверждении

концепции развития системы высшего образования республики Узбекистан до 2030 года”, основные задачи, поставленные перед развитием физики в его послании Олий Мажлису<sup>3</sup> от 29 декабря 2020 года, указ от 19 марта 2021 года № П-5032 «О мерах по повышению качества образования и совершенствованию научных исследований в области физики», указ от 13 января 2022 года № ПҚ-82 «О дополнительных мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Самаркандского государственного университета» и другие нормативные акты, в определенной степени, относящиеся к этой деятельности.

**Соответствие исследования с приоритетными направлениями развития науки и технологий республики.** Диссертация выполнена в рамках соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан – II. «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение».

**Степень изученности проблемы.** Хотя электрические, магнитные, гальваномагнитные и термические свойства сплавов на основе переходных металлов изучались в последние годы, комплексные исследования этих свойств и их взаимосвязей редки. Учитывая это, комплексное изучение вышеуказанных характеристик и демонстрация взаимосвязей этих характеристик является основной частью работы. Если эти вопросы будут полностью решены, то будет решена и проблема их практического использования.

В последние годы в работе над проектом приняли участие зарубежные ученые: Дора Яновски, Мария Сведда (Венгрия), М.Л. Лобанов, С.В. Гриб, Л.Ю. Фетисов, Ю.К. Фетисов, Н.С. Перов, Д.В. Чашин, В.А. Катаев, Р.С. Исхаков, А.В. Ведяев, А.Б. Грановский, А.Л. Хорошилов, А.С. Макаров, И.Е. Пермякова (Россия), М.Ю. Барабаш, Л.Ю. Куницкая, Л.Г. Хоменко, Ю.А. Куницкий (Украина), Дж. Хемалатха (Индия), Линсян Ши, Сяолу Цинь, Кэфу Яо, Ю.З. Ван, Ф.М. Ян, Ю.С. У, М.Ю. Фэн, В.С. Чжань (Китай), М.М. Сафаров (Таджикистан). Они внесли большой вклад в развитие науки, изучая различные свойства ферромагнитных сплавов.

Также узбекские ученые, среди которых академик К. Мукимов, профессора О.К. Кувондилов, У. Валиев, Д. Джураев, М.Т. Нормурадов, Ф. Ахмеджанов, М. Шарипов, Ш. Рахимов, А.С. Саидов, Э.У. Арзикулов, У. Усаров, доценты Х. Шакаров, Х.М. Норкораев, И. Субханкулов, Н.С. Хамраев, Р.М. Ражабов и другие, на протяжении многих лет проводили научные исследования в этой области, теоретически и экспериментально изучая методы получения металлических сплавов, их электрические, магнитные, гальваномагнитные, магнитооптические, акустические и тепловые свойства.

Анализ экспериментальных и теоретических исследований, проведенных в последние годы, показал, что электрические, магнитные и

---

<sup>3</sup> Послание Президента Республики Узбекистан Шавката Мирзиёева Олий Мажлису // Народное слово 2020 г., 30 декабря, №275-276 (7746-7747) С.1

термические свойства сплавов на основе элементов группы железа и их взаимосвязи изучены недостаточно, и не достигнуто понимания причин различий в их магнитной природе.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего учебного заведения, где выполнена диссертационная работа.** Диссертация является частью научно-исследовательского плана Самаркандского государственного университета имени Шарофа Рашидова, основная научная тема кафедры общей физики: 2/7 д.к.р. № 01860103966 «Исследование электрических, магнитных и гальваномагнитных свойств сплавов и интерметаллических соединений на основе переходных и редкоземельных элементов в упорядоченном и неупорядоченном состоянии атомов».

**Целью исследования** является получение экспериментальных результатов электрических, магнитных, гальваномагнитных и термических свойств системы сплавов на основе 3d-переходных металлов в аморфном состоянии и анализ этих свойств в ферромагнитной и парамагнитной области.

**Задачи исследования:**

Получение экспериментальных результатов по температурным зависимостям удельного электрического сопротивления, коэффициента Холла и удельной теплоемкости сплавов системы Fe-Ni-Si-C и Fe-Cr-B от аморфного состояния образцов до точки перехода в кристаллическое состояние;

изучение влияния концентрации металлоидов на структуру, на термическую стабильность и на кинетические свойства исследуемых аморфных сплавов;

изучение электрических, гальваномагнитных и термических свойств ферромагнитных аморфных сплавов 3d-металлов в области перехода в кристаллическое состояние;

изучение температурных зависимостей удельного электросопротивления, коэффициента Холла и удельной теплоемкости сплавов системы Fe-Ni-Si-C и Fe-Cr-B в аморфном состоянии в области фазового перехода ферромагнетик - парамагнетик.

**Объектом исследования** в качестве материалов были выбраны аморфные сплавы  $Fe_{67.3}Ni_{18.2}Si_{5.1}C_{9.4}$ ,  $Fe_{68.5}Ni_{19.1}Si_{4.9}C_{7.5}$ ,  $Fe_{70.5}Ni_{18.3}Si_{5.0}C_{6.2}$  и  $Fe_{71.6}Ni_{18.7}Si_{5.0}C_{4.7}$  относящиеся к системе Fe-Ni-Si-C на основе элементов группы железа, а также  $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$ ,  $Fe_{73}Cr_{12}B_{15}$ ,  $Fe_{75}Cr_{10}B_{15}$  и  $Fe_{77}Cr_{8}B_{15}$ , относящиеся к системе Fe-Cr-B.

**Предмет исследования** характеризуется комплексным изучением электрических, магнитных, гальваномагнитных и тепловых свойств сплавов на основе 3d-металлов, установлением взаимосвязи между ними и интерпретацией этой взаимосвязи с позиций теории аномального эффекта Холла, а также оценкой коэффициентов спин-орбитального взаимодействия на основе экспериментальных результатов.

**Методы исследования.** В ходе исследований были использованы следующие методы измерения различных свойств аморфных сплавов на основе элементов группы железа: метод рентгеноспектрального анализа (EDX) для элементного состава, морфологический анализ расположения атомов с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), метод рентгеновской дифракционной спектроскопии для изучения структурного состояния образцов, метод Ван дер Пау для измерения относительного электросопротивления и эффекта Холла, калориметрический метод измерения теплоемкости образцов, а также метод вибрационного магнитометра для измерения намагниченности.

**Научная новизна** исследования заключается в следующем:

впервые получен комплекс экспериментальных данных по температурным зависимостям удельного электросопротивления, коэффициента Холла и удельной теплоемкости сплавов системы Fe-Ni-Si-C и Fe-Cr-B от аморфного состояния образцов до точки перехода в кристаллическое состояние;

изучены корреляции температурных зависимостей удельного электросопротивления, коэффициента Холла и удельной теплоемкости сплавов системы Fe-Ni-Si-C и Fe-Cr-B в аморфном состоянии и выявлен фазовый переход II рода ферромагнетик – парамагнетик;

изучены влияние металлоидов (Si+C) на структуру, термическую стабильность и кинетические свойства образцов системы Fe-Ni-Si-C. Показано, что с увеличением концентрации металлоидов в исследуемых аморфных сплавах эффективное значение коэффициента Холла и температура кристаллизации увеличиваются, а температура Кюри уменьшается;

по взаимосвязи между аномальным коэффициентом Холла и удельного электросопротивления, а также влияния концентрации металлоидов на абсолютное значение и термический коэффициент сопротивления в аморфных сплавах, показано, что теория Ведяева-Грановского и корреляция Муиджи справедливо в аморфном состоянии;

по экспериментально полученным результатам зависимости удельной теплоемкости  $C_p(T)$  в аморфных сплавах системы Fe-Ni-Si-C и Fe-Cr-B, показано, что при переходе из аморфного состояния в кристаллическое образуются нанокристаллические домены.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

Впервые определены температурные зависимости удельной теплоемкости  $C_p(T)$ , температуры Кюри  $T_C$ , температуры кристаллизации  $T_K$  и изменения энтальпии  $\Delta H$  аморфных сплавов систем Fe-Ni-Si-C и Fe-Cr-B.

Практическим результатом исследования является то, что возможно определение фазовых переходов, происходящих в аморфных ферромагнитных твердых телах на основе переходных металлов, посредством воздействия температуры и внешнего магнитного поля.

Показано, что оценить характер спин-орбитальных взаимодействий, происходящих в аморфных ферромагнитных сплавах, можно путем комплексного изучения электрических, магнитных, гальваномагнитных и тепловых свойств.

**Достоверность результатов** Электрические, магнитные, гальваномагнитные и тепловые свойства образцов, изучаемых в работе, были исследованы с использованием надежных экспериментальных методов испытаний, широко используемых в научных исследованиях и в приборах с высокими экспериментальными возможностями; хорошее согласие теоретических и экспериментальных значений экспериментальных результатов; анализ погрешностей измерений; полученные результаты согласуются с существующими физическими концепциями и данными, представленными в научной литературе, а также подтверждены их публикацией в научных журналах, индексируемых в базе данных Scopus.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость результатов исследования заключается в том, что полученные в диссертационной работе научные результаты служат для объяснения электрических, магнитных и тепловых свойств аморфных ферромагнитных сплавов на основе 3d-элементов, а также для анализа теории конденсированных состояний, в частности, теории сплавов с неупорядоченными атомами.

Практическая значимость результатов исследований заключается в том, что путем изучения электрических, магнитных и гальваномагнитных свойств аморфных сплавов на основе 3d-элементов показана возможность их использования в качестве сердечников трансформаторов и элементов электронных приборов на основе значений коэрцитивной силы.

#### **Внедрение результатов исследования.**

Результаты исследования структуры, морфологии и электрических свойств аморфных лент системы Fe-Ni-Si-C были использованы для интерпретации экспериментальных данных в ходе исследований, проводимых в рамках проекта № ФЗГМ-2023-0006 (Акт Воронежского государственного технического университета от 20.01.2025, Российская Федерация). На основании полученных результатов объяснена термическая стабильность тонкопленочных нанокompозитных материалов на основе элементов группы железа.

Результаты температурной зависимости теплоемкости аморфных ферромагнитных сплавов в диссертационной работе были использованы для объяснения тепловых свойств органических веществ (Акт Технического университета Таджикистана им. М.С. Осимий от 14.02.2025 г.). Использование научных результатов позволило определить тепловые эффекты в этих веществах.

**Апробация результатов исследования.** Результаты диссертации были представлены и обсуждены на 8 международных и 9 республиканских научных конференциях.

**Публикации результатов исследования.** Всего по теме исследования опубликовано 24 научные работы, в том числе 7 научных статей (4 республиканских и 3 зарубежных журнала в Scopus) из списка научных журналов, рекомендованных к публикации основных научных результатов по диссертации высшей аттестационной комиссии Республики Узбекистан.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 114 страниц, в том числе 41 рисунок и 8 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В части «**Введение**» диссертации устанавливается актуальность и необходимость темы диссертации, выявляется связь исследования с основными приоритетными направлениями научно-технического развития республики, обосновывается уровень изученности проблемы, формулируется задача и цель, определяются объекты, метод и предмет исследования, научная новизна исследования, устанавливается достоверность полученных результатов, раскрывается их теоретическая и практическая значимость, приводятся краткие сведения об апробации работы и внедрении полученных результатов, излагаются структура и объем диссертации.

В первой главе диссертации под названием «**Структура, электрические, магнитные и тепловые свойства переходных сплавов на основе 3d-металлов (Обзор литературы)**» представлен обзор литературы, посвященной экспериментальным и теоретическим исследованиям методов получения аморфных ферромагнитных сплавов, их применения и физических свойств.

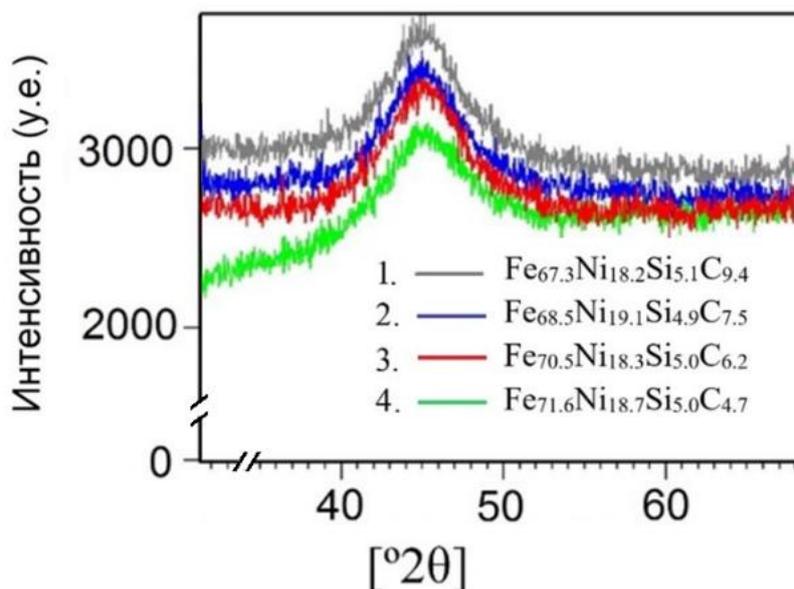
Приведены также сведения о теоретических основах, значении и современных методах исследования электрических, гальваномагнитных, магнитных и тепловых свойств аморфных сплавов. Такая информация важна для определения цели диссертации, ее реализации и анализа полученных результатов. В конце первой главы представлены заключение и постановка задачи.

Во второй главе диссертации под названием «**Методы и методы экспериментального исследования**» в качестве исследовательских образцов были взяты следующие аморфные сплавы, относящиеся к системе Fe-Ni-Si-C:  $Fe_{67,3}Ni_{18,2}Si_{5,1}C_{9,4}$ ,  $Fe_{68,5}Ni_{19,1}Si_{4,9}C_{7,5}$ ,  $Fe_{70,5}Ni_{18,3}Si_{5,0}C_{6,2}$  и  $Fe_{71,6}Ni_{18,7}Si_{5,0}C_{4,7}$ , а также к системе Fe-Cr-B: сплавов  $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$ ,  $Fe_{73}Cr_{12}B_{15}$ ,  $Fe_{75}Cr_{10}B_{15}$  и  $Fe_{77}Cr_8B_{15}$ . Приведено описание экспериментальных приборов, использованных для исследования структуры и морфологии образцов: сканирующий электронный микроскоп SEM - EVO MA 10 (Zeiss, Германия), рентгеновский дифрактометр XRD Malvern PANalytical® Empyrean Series 3, прибор на основе метода Вандер Пау для измерения относительного электрического сопротивления и эффекта Холла, калориметрический синхронный термоанализатор STA PT 1600 для измерения относительной

теплоемкости, вибрационный магнитометр для измерения намагниченности. Детальный анализ показал, что максимальная погрешность измерений в этих приборах не превышает 3%.

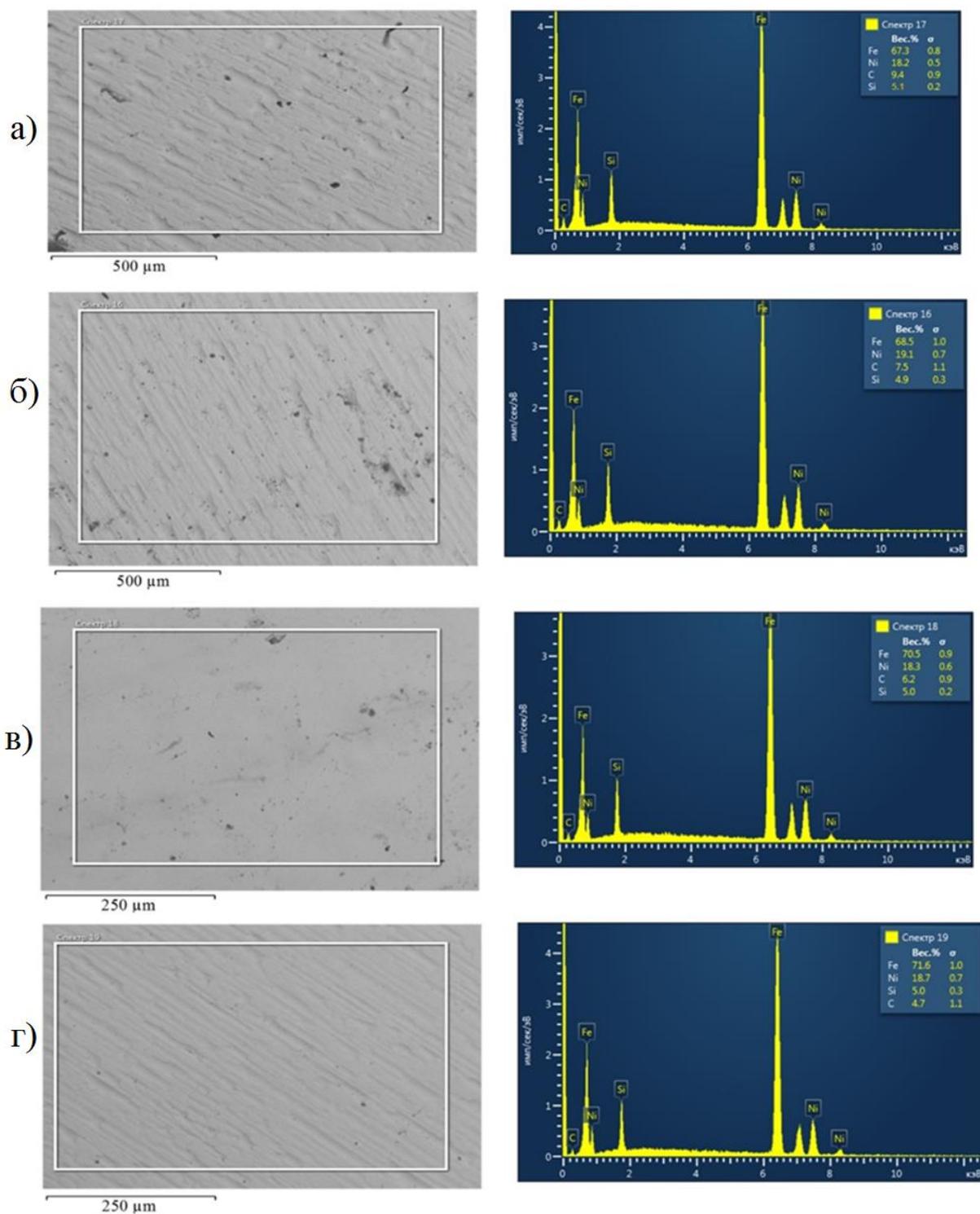
Третья глава диссертации называется «**Электрические, гальваномагнитные и тепловые свойства аморфных сплавов системы Fe-Ni-Si-C и их взаимосвязь**». Структура аморфных сплавов, содержащих элементы Fe-Ni-Si-C, исследовалась методом рентгеноструктурного анализа. В этом случае отбиралось необходимое количество образца в виде ленты, помещалось в специальную кювету и на его поверхность направлялось монохроматическое рентгеновское излучение под углом  $10 - 70^\circ$ . В результате рентгеновские лучи дифрагируют на образце под углом, удовлетворяющим условию Вульфа-Брэгга. Структуру образцов анализировали по спектру зависимости интенсивности дифрагированных рентгеновских лучей от угла падения на поверхность образца.

На рисунке 1 показано, что спектр рентгеновской дифракции дает широкий спектр в диапазоне углов дифракции  $2\theta = 40^\circ - 50^\circ$  с максимумом, наблюдаемым при  $45^\circ$ . Это указывало на то, что образец находился в аморфном состоянии.



**Рис. 1. Рентгеновские спектры четырех аморфных металлических сплавов, содержащих элементы Fe, Ni, Si и C, полученные на рентгеновском дифрактометре Panalytical Empyrean.**

Для определения соответствия исходного элементного состава использовался сканирующий электронный микроскоп SEM - EVO MA 10 (Zeiss, Германия). На рисунке 2 представлены изображения образцов и их снимки, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа в масштабе  $250 \div 500$  мкм, а также количественный анализ полученного элементного состава. Элементный состав аморфных сплавов хорошо соответствует данным элементного состава производителя.

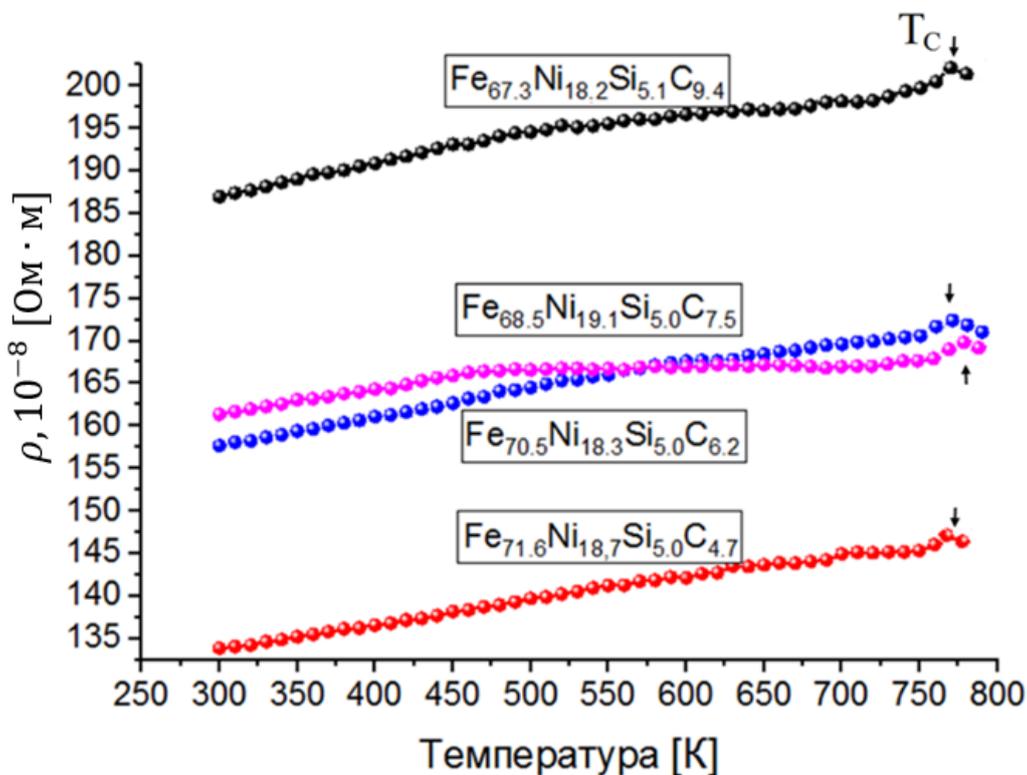


**Рис. 2. Изображения элементного состава сплавов на основе Fe и Ni с добавками металлоидов Si и C в аморфном состоянии, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ): а) Fe<sub>67.3</sub>Ni<sub>18.2</sub>Si<sub>5.1</sub>C<sub>9.4</sub>, б) Fe<sub>68.5</sub>Ni<sub>19.1</sub>Si<sub>4.9</sub>C<sub>7.5</sub>, в) Fe<sub>70.5</sub>Ni<sub>18.3</sub>Si<sub>5.0</sub>C<sub>6.2</sub>, г) Fe<sub>71.6</sub>Ni<sub>18.7</sub>Si<sub>5.0</sub>C<sub>4.7</sub>.**

Проведено экспериментальное исследование зависимости относительного электросопротивления  $\rho$  и коэффициента Холла  $R_H$  от температуры  $T$  в ферромагнитных сплавах аморфной системы Fe-Ni-Si-C и исследована взаимосвязь между этими параметрами. Зависимости удельного

сопротивления  $\rho$  и коэффициента Холла от температуры  $T$  этих ферромагнитных сплавов были измерены с использованием метода Ван дер Пау.

Температурная зависимость удельного электросопротивления аморфных сплавов  $\text{Fe}_{67.3}\text{Ni}_{18.2}\text{Si}_{5.1}\text{C}_{9.4}$ ,  $\text{Fe}_{68.5}\text{Ni}_{19.1}\text{Si}_{5.0}\text{C}_{7.5}$ ,  $\text{Fe}_{70.5}\text{Ni}_{18.3}\text{Si}_{5.0}\text{C}_{6.2}$  и  $\text{Fe}_{71.6}\text{Ni}_{18.7}\text{Si}_{5.0}\text{C}_{4.7}$  представлена на рисунке 3.



**Рис.3. Температурная зависимость удельного электросопротивления сплавов системы Fe-Ni-Si-C в аморфном состоянии.**

Из рисунка 3 видно, что для всех исследованных аморфных ферромагнитных сплавов удельное электрическое сопротивление увеличивается с ростом температуры, что согласуется с корреляцией Муиджи.

Увеличение концентрации металлоидов (Si+C) в составе образцов приводит к уменьшению количества токонесящих зарядов и повышению их диффузионного потенциала, что приводит к увеличению удельного электросопротивления  $\rho$  образцов и уменьшению температурного коэффициента сопротивления  $\partial\rho/\partial T$ . Из анализа температурной зависимости удельного электросопротивления исследуемых сплавов следует, что с увеличением концентрации металлоидов абсолютная величина удельного электросопротивления  $\rho_0$  увеличивается, а его температурный коэффициент  $\partial\rho/\partial T$  уменьшается.

Абсолютное значение удельного электросопротивления  $\rho_0$  при комнатной температуре, температурный коэффициент сопротивления  $\partial\rho/\partial T$  и температура Кюри  $T_C$  для образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Результаты абсолютного удельного сопротивления  $\rho_0$ , температурного коэффициента сопротивления  $\partial\rho/\partial T$  и температуры Кюри  $T_C$  сплавов системы Fe-Ni-Si-C

| Образец  | %<br>(Si+C) | $\rho_0$<br>$\times 10^{-8} \Omega m$ | $\partial\rho/\partial T$<br>$\times 10^{-10} \Omega m K^{-1}$ | $T_C$ ,<br>K |
|--|-------------|---------------------------------------|--|--------------|
| Fe <sub>71.6</sub> Ni <sub>18.7</sub> Si <sub>5.0</sub> C <sub>4.7</sub> | 9,7         | 134.8                                 | 3,86   | 770          |
| Fe <sub>70.5</sub> Ni <sub>18.3</sub> Si <sub>5.0</sub> C <sub>6.2</sub> | 11,2        | 157.5                                 | 3,44   | 767          |
| Fe <sub>68.5</sub> Ni <sub>19.1</sub> Si <sub>4.9</sub> C <sub>7.5</sub> | 12,5        | 162                                   | 3,3  | 764          |
| Fe <sub>67.3</sub> Ni <sub>18.2</sub> Si <sub>5.1</sub> C <sub>9.4</sub> | 14,5        | 187                                   | 3,15   | 761          |

Из таблицы видно, что с увеличением концентрации металлоидов (Si+C) в образцах наблюдается снижение температуры Кюри  $T_C$ . Это связано с тем, что уменьшение концентрации ферромагнитных металлов в образце приводит к уменьшению энергии обменного взаимодействия между ферромагнитными атомами, что в свою очередь приводит к снижению температуры Кюри. В свою очередь увеличением концентрации металлоидов уменьшается эффективное число носителей заряда в образце, что приводит к увеличению абсолютного значения удельного электросопротивления.

Экспериментально исследована зависимость коэффициента Холла  $R_H$  ферромагнитных сплавов аморфной системы Fe-Ni-Si-C от температуры  $T$  в диапазоне от комнатной температуры до 773 К. Эксперименты проводились на измерительной установке, работающей по методу Ван дер Пау. Температурная зависимость коэффициента Холла  $R_H$  аморфных сплавов Fe<sub>67.3</sub>Ni<sub>18.2</sub>Si<sub>5.1</sub>C<sub>9.4</sub>, Fe<sub>68.5</sub>Ni<sub>19.1</sub>Si<sub>4.9</sub>C<sub>7.5</sub>, Fe<sub>70.5</sub>Ni<sub>18.3</sub>Si<sub>5.0</sub>C<sub>6.2</sub> и Fe<sub>71.6</sub>Ni<sub>18.7</sub>Si<sub>5.0</sub>C<sub>4.7</sub> представлена на рисунке 4.

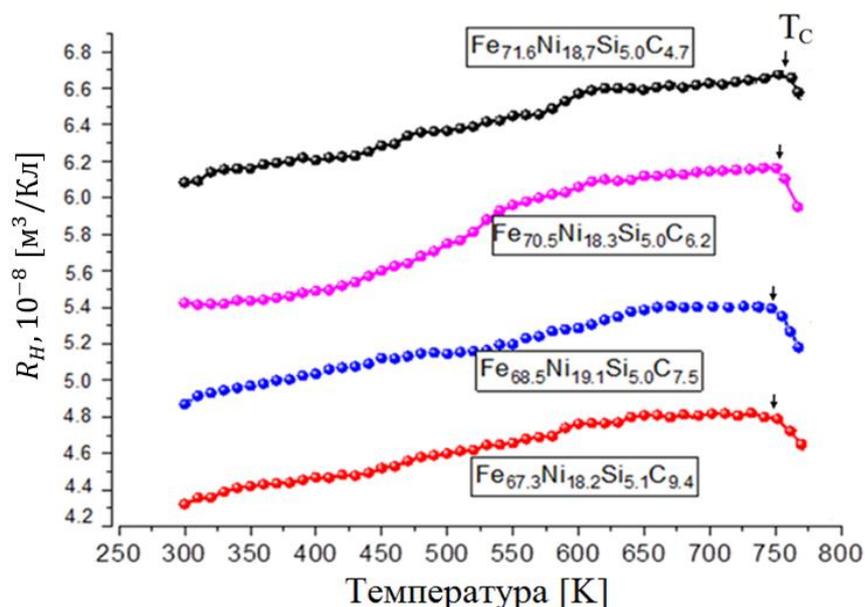
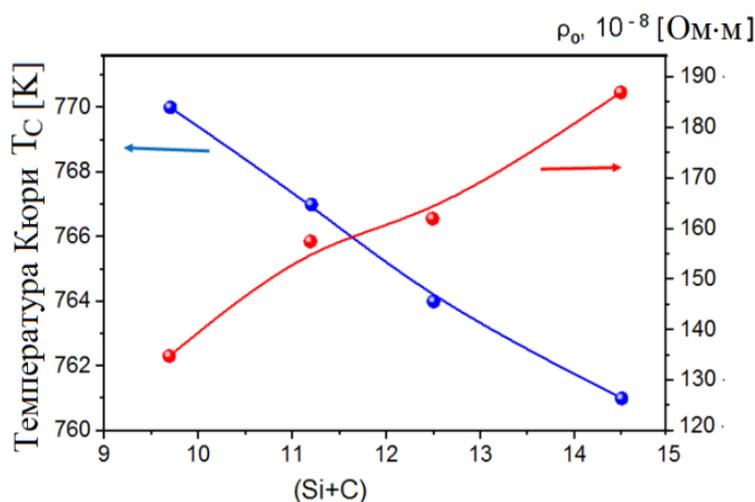


Рис. 4.  
Температурная  
зависимость  
коэффициента  
Холла сплавов  
аморфной системы  
Fe-Ni-Si-C.

Из рисунка 4 видно, что коэффициент Холла образцов увеличивается с ростом температуры. При достижении температурой определенного значения наблюдается резкое уменьшение коэффициента Холла. Эти температуры составляют:  $T_K=761$  К для  $Fe_{67.3}Ni_{18.2}Si_{5.1}C_{9.4}$ ,  $T_K=764$  К для  $Fe_{68.5}Ni_{19.1}Si_{4.9}C_{7.5}$ ,  $T_K=767$  К для  $Fe_{70.5}Ni_{18.3}Si_{5.0}C_{6.2}$  и  $T_K=770$  К для  $Fe_{71.6}Ni_{18.7}Si_{5.0}C_{4.7}$  соответственно. Анализ показал, что температуры Кюри, определенные из температурной зависимости коэффициента Холла  $R_H(T)$  образцов, хорошо согласуются с температурами Кюри, определенными из температурной зависимости удельного электросопротивления этих образцов.

Результаты анализа можно обобщить и графически представить следующим образом.



**Рис. 5. Зависимость температуры Кюри  $T_C$  и удельного электросопротивления  $\rho_0$  сплавов системы Fe-Ni-Si-C от концентрации металлоидов (Si+C)**

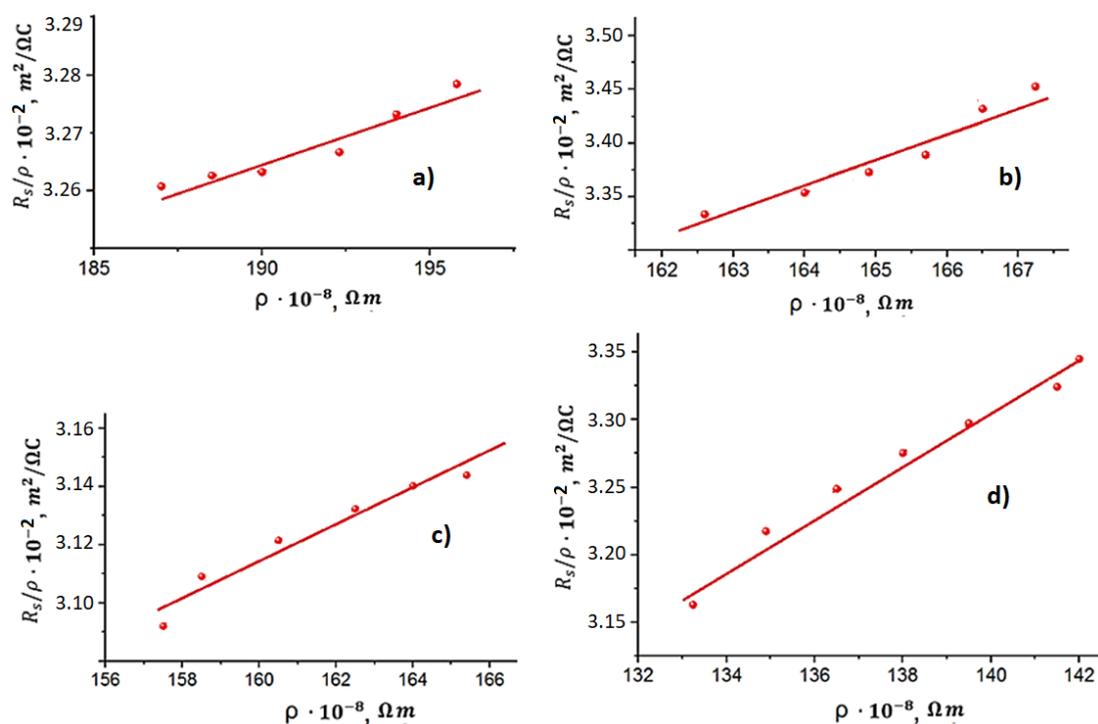
На рисунке 5 показано, что в сплавах системы Fe-Ni-Si-C с увеличением концентрации металлоидов (Si+C) наблюдается снижение температуры Кюри  $T_C$ . В свою очередь, увеличение концентрации металлоидов и уменьшение концентрации ферромагнитных металлов уменьшает количество эффективных носителей заряда в образце, что приводит к увеличению абсолютного значения удельного электросопротивления.

Из температурной зависимости  $\rho(T)$  и  $R_S(T)$  обнаружена линейная зависимость между  $R_S/\rho$  и  $\rho$  в определенном диапазоне температур ( $T < T_C$ ), что подтверждает выражение  $R_S = a\rho + b\rho^2$ . Значения коэффициентов  $a$  и  $b$  приведены в таблице 2.

**Таблица 2.**

| Образец                             | Диапазон температур, K | $a \cdot 10^{-3}$ , $m^2/\Omega C$ | $b \cdot 10^{-5}$ , $m/\Omega^2 C$ |
|-------------------------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| $Fe_{67.3}Ni_{18.2}Si_{5.1}C_{9.4}$ | 300-550                | 19.8                               | 2.1                                |
| $Fe_{68.5}Ni_{19.1}Si_{4.9}C_{7.5}$ | 300-500                | 18.2                               | 6.3                                |
| $Fe_{70.5}Ni_{18.3}Si_{5.0}C_{6.2}$ | 300-550                | 17.4                               | 7.5                                |
| $Fe_{71.6}Ni_{18.7}Si_{5.0}C_{4.7}$ | 350-600                | 12.6                               | 13.5                               |

Значение аномального коэффициента Холла обычно значительно больше в сплавах с высоким содержанием металлоидов. Вероятно, это является прямым результатом связи между коэффициентом Холла и электрическим сопротивлением сплавов в аморфном состоянии.



**Рис. 6. Зависимость  $R_S/\rho$  от  $\rho$  для аморфных сплавов системы Fe-Ni-Si-C: a)  $Fe_{67.3}Ni_{18.2}Si_{5.1}C_{9.4}$ ; b)  $Fe_{68.5}Ni_{19.1}Si_{4.9}C_{7.5}$ ; c)  $Fe_{70.5}Ni_{18.3}Si_{5.0}C_{6.2}$ ; d)  $Fe_{71.6}Ni_{18.7}Si_{5.0}C_{4.7}$**

Значение аномального коэффициента Холла  $R_S$  детально зависит от структуры материала, псевдопотенциалами и является параметром, весьма чувствительным к микроструктуре сплавов. Различия в значениях коэффициентов  $a$  и  $b$  уравнения  $R_S = a\rho + b\rho^2$  для изученных ферромагнитных сплавов свидетельствуют об изменении электронного спектра при изменении состава аморфных сплавов.

С использованием данных по температурной зависимости относительного электросопротивления и коэффициента Холла рассчитан эффективный параметр спин-орбитального взаимодействия  $\lambda_{SO}$  в ферромагнитных аморфных сплавах системы Fe-Ni-Si-C. Этот параметр определяется из следующего выражения<sup>4</sup>.

$$R_S = \frac{2e^2}{\mu_0 \mu_B \hbar g} \rho^2 \lambda_{SO} \quad , \quad (1)$$

где  $\mu_B = 0,927 \cdot 10^{-23}$  Дж/Тл – магнетон Бора,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная,  $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона,  $\rho$  – удельное сопротивление,  $g \approx 2$  фактор Ланде для переходных металлов.

Результаты расчета приведена в таблице 3.

<sup>4</sup> Trudeau M., Cochrane R. W., Baxter D. V., Strom-Olsen J. O. and Muir W. B. // Phys. Rev., v.37, N 9, 1988, p.4499-4502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.37.4499>

Таблица 3

Значения коэффициента Холла  $R_H$ , удельного электросопротивления  $\rho$  и эффективного параметра спин-орбитального взаимодействия  $\lambda_{SO}$  для ферромагнитного состояния сплавов системы Fe-Ni-Si-C

| Т (К) | $Fe_{71.6}Ni_{18.7}Si_{5.0}C_{4.7}$         |                                  |                                       | $Fe_{70.5}Ni_{18.3}Si_{5.0}C_{6.2}$         |                                  |                                       |
|-------|---|----------------------------------|---------------------------------------|---|----------------------------------|---------------------------------------|
|       | $R_H \cdot 10^{-8}$<br>[ $\frac{M^3}{Kл}$ ] | $\rho \cdot 10^{-8}$<br>[Ом · м] | $\lambda_{SO} \cdot 10^{-21}$<br>[Дж] | $R_H \cdot 10^{-8}$<br>[ $\frac{M^3}{Kл}$ ] | $\rho \cdot 10^{-8}$<br>[Ом · м] | $\lambda_{SO} \cdot 10^{-21}$<br>[Дж] |
| 300   | 6.05  | 134                              | 1.61                                  | 5.54  | 157                              | 1.07                                  |
| 350   | 6.1   | 136                              | 1.59                                  | 5.45  | 158                              | 1.04                                  |
| 400   | 6.2   | 137                              | 1.58                                  | 5.5   | 159                              | 1.04                                  |
| 450   | 6.25  | 138.5                            | 1.56                                  | 5.6   | 161                              | 1.03                                  |
| 500   | 6.3   | 140                              | 1.55                                  | 5.7   | 163                              | 1.02                                  |
| 550   | 6.4   | 141                              | 1.54                                  | 5.85  | 165                              | 1.02                                  |
| 600   | 6.46  | 142.5                            | 1.53                                  | 6   | 167                              | 1.03                                  |
| 650   | 6.55  | 144                              | 1.52                                  | 6.1   | 168.5                            | 1.02                                  |
| 700   | 6.65  | 145                              | 1.51                                  | 6.15  | 170                              | 1.02                                  |

| Т (К) | $Fe_{68.5}Ni_{19.1}Si_{4.9}C_{7.5}$         |                                  |                                       | $Fe_{67.3}Ni_{18.2}Si_{5.1}C_{9.4}$         |                                  |                                       |
|-------|---|----------------------------------|---------------------------------------|---|----------------------------------|---------------------------------------|
|       | $R_H \cdot 10^{-8}$<br>[ $\frac{M^3}{Kл}$ ] | $\rho \cdot 10^{-8}$<br>[Ом · м] | $\lambda_{SO} \cdot 10^{-21}$<br>[Дж] | $R_H \cdot 10^{-8}$<br>[ $\frac{M^3}{Kл}$ ] | $\rho \cdot 10^{-8}$<br>[Ом · м] | $\lambda_{SO} \cdot 10^{-21}$<br>[Дж] |
| 300   | 4.82  | 161                              | 0.891                                 | 4.3   | 186                              | 0.595                                 |
| 350   | 4.9   | 162                              | 0.895                                 | 4.4   | 187.5                            | 0.599                                 |
| 400   | 5   | 163                              | 0.902                                 | 4.47  | 189                              | 0.599                                 |
| 450   | 5.05  | 164                              | 0.9                                   | 4.55  | 192                              | 0.591                                 |
| 500   | 5.1   | 165.5                            | 0.892                                 | 4.6   | 194                              | 0.585                                 |
| 550   | 5.2   | 166.5                            | 0.899                                 | 4.7   | 196                              | 0.586                                 |
| 600   | 5.3   | 167.5                            | 0.9                                   | 4.75  | 197                              | 0.586                                 |
| 650   | 5.35  | 168                              | 0.905                                 | 4.8   | 197.5                            | 0.589                                 |
| 700   | 5.4   | 169                              | 0.906                                 | 4.83  | 199                              | 0.584                                 |

Как видно из таблицы 3, эффективный параметр спин-орбитального взаимодействия в ферромагнитном состоянии слабо зависит от температуры и уменьшается с ростом температуры. Это указывает на то, что в ферромагнитном состоянии эффективный параметр спин-орбитального взаимодействия  $\lambda_{SO}$  в основном обусловлен искажением спинового рассеяния электронов проводимости.

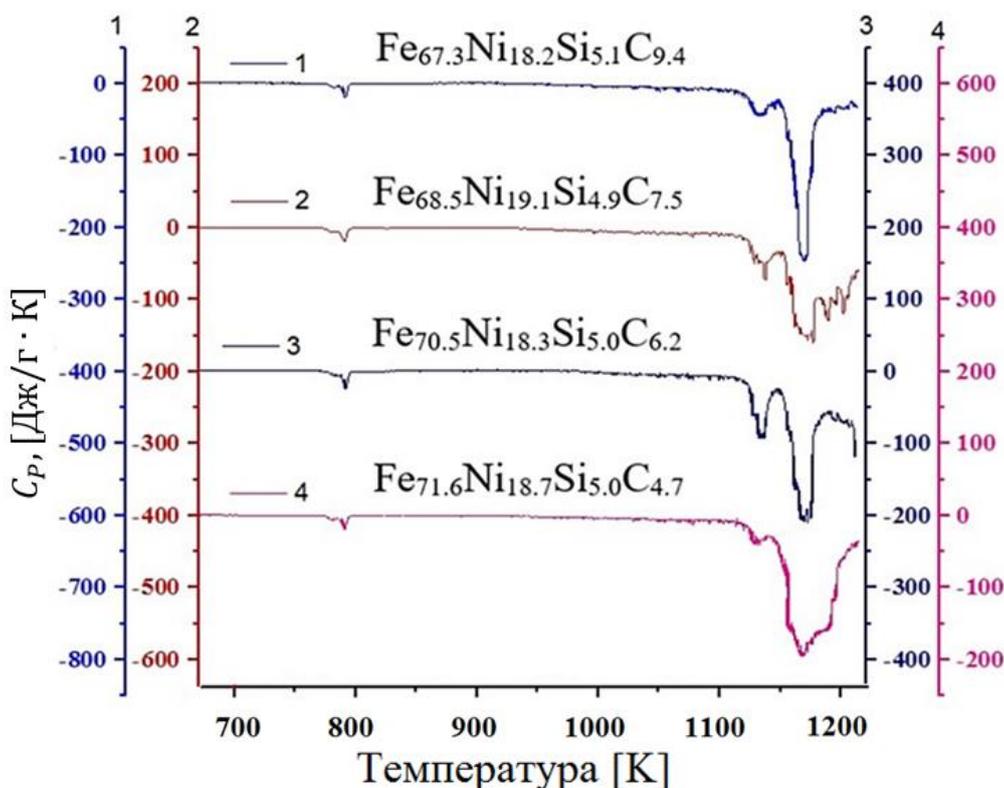
Калориметрический анализ был проведен для аморфных сплавов  $Fe_{67.3}Ni_{18.2}Si_{5.1}C_{9.4}$ ,  $Fe_{68.5}Ni_{19.1}Si_{4.9}C_{7.5}$ ,  $Fe_{70.5}Ni_{18.3}Si_{5.0}C_{6.2}$  и  $Fe_{71.6}Ni_{18.7}Si_{5.0}C_{4.7}$ , относящихся к системе Fe-Ni-Si-C. Получены графики зависимости

теплового потока от температуры в аморфных сплавах, массы и удельной теплоемкости в интервале температур от комнатной до 1273 К.

Экспериментальные данные относительно влияния температуры на теплоемкость аморфных сплавов позволяют выявить возникающие структурные изменения. Термическую стабильность аморфных сплавов определяли с помощью ДСК. Эксперименты показали, что образцы остаются стабильными до температуры около 770 К, при последующих изменениях температуры в образцах наблюдается фазовый переход II типа ферромагнетизм-парамагнетизм и переход в кристаллическое состояние. В данных ДСК наблюдались только два четко выраженных экзотермических пика при температурах соответствующих окрестности температуры Кюри и температуры кристаллизации, которые наблюдались при температурах 770-790 К и 1120-1200 К.

Появление дополнительных слабо выраженных минимумов при 1120-1200 К, вероятно, обусловлено сложными процессами, происходящими при полной кристаллизации.

На рисунке 7 представлена зависимость теплоемкости при постоянном давлении ( $C_p$ , [Дж/г·К]) от температуры  $T$ , [К] для исследованных аморфных сплавов.



**Рис. 7. Зависимость удельной теплоемкости  $C_p$  аморфных сплавов на основе Fe, Ni, Si и C от температуры.**

Значения энтальпии  $\Delta H$  для всех исследованных образцов представлены в таблице 4. Приведены результаты расчета объема кристаллизационной фракции образцов при нагревании от 770 до 1200 К.

Таблица 4

Значения  $\Delta H$  –изменения энтальпии сплавов системы Fe-Ni-Si-C

| Образец   | Тепловой эффект $\Delta H_1$ [Дж/г] (770 - 805 К) | Тепловой эффект $\Delta H_{2(общей)}$ [Дж/г] (920 – 1200 К) | Тепловой эффект $\Delta H_{2(аморф+кристалл)}$ [Дж/г] (920 – 1140 К) | $V_{\text{фрак, \%}}$ |
|---|---|---|--|-----------------------|
| $\text{Fe}_{67.3}\text{Ni}_{18.2}\text{Si}_{5.1}\text{C}_{9.4}$ | -128.2  | -11580.5  | -1277  | 88                    |
| $\text{Fe}_{68.5}\text{Ni}_{19.1}\text{Si}_{4.9}\text{C}_{7.5}$ | -164.2  | -14058.4  | -1636.8  | 88                    |
| $\text{Fe}_{70.5}\text{Ni}_{18.3}\text{Si}_{5.0}\text{C}_{6.2}$ | -151.4  | -15855.0  | -1295  | 91                    |
| $\text{Fe}_{71.6}\text{Ni}_{18.7}\text{Si}_{5.0}\text{C}_{4.7}$ | -143.1  | -11848.3  | -1194.5  | 90                    |

Экспериментальные результаты, представленные на рис. 6, показывают, что до температуры 770 К образцы не претерпевают никаких фазовых изменений, вызывающих значительный тепловой эффект. При температуре 770 К наблюдается первый тепловой эффект, который продолжается до температуры 805 К. Начиная с 900 К значение удельной теплоемкости уменьшалось, причем резкое падение наблюдалось при 1100 К. Этот тепловой эффект объясняет образование нанокристаллических структур в образце. После этого наблюдается еще один тепловой эффект при 1140 К, в ходе которого образец переходит в полностью кристаллическое состояние. Это происходит в диапазоне температур 1140–1200 К. Первый тепловой эффект соответствует поглощению тепла при образовании нанокристаллических доменов из аморфного состояния сплава, а второй тепловой эффект соответствует поглощению тепла при фазовом переходе типа рекристаллизации.

Четвертая глава диссертации называется «Электрические, гальваномагнитные, магнитные и тепловые свойства аморфных сплавов системы Fe-Cr-V и их анализ», в которой проведен рентгенофазовый анализ на рентгеновском дифрактометре Panalytical Empyrean с целью получения информации о структуре и состоянии исследуемых образцов.

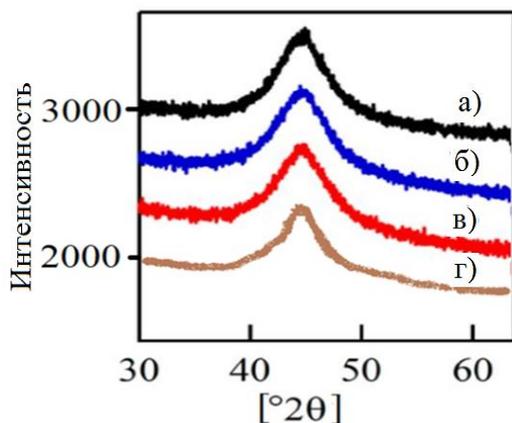
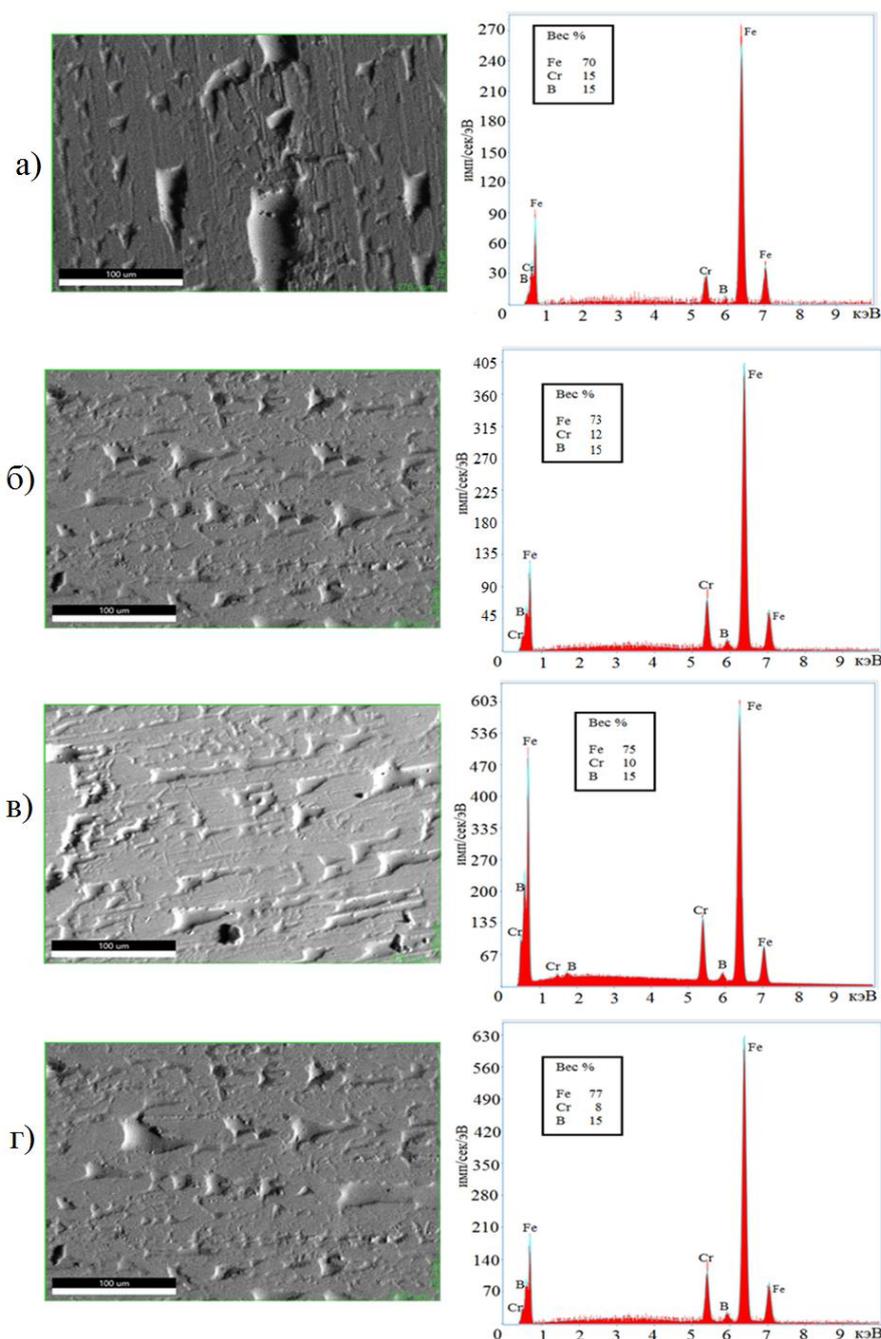


Рис. 8. Рентгеновские спектры аморфных металлических сплавов, полученные на рентгеновском дифрактометре Panalytical Empyrean:

а)  $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ , б)  $\text{Fe}_{73}\text{Cr}_{12}\text{B}_{15}$ ,  
в)  $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{10}\text{B}_{15}$  и г)  $\text{Fe}_{77}\text{Cr}_{8}\text{B}_{15}$

Анализ рисунка 8 показывает, что в спектре рентгеновской дифракции исследованных образцов не наблюдалось острых дифракционных пиков, соответствующих кристаллическим фазам, что подтверждает, что все образцы находились в аморфном состоянии. Спектры дифракции показали широкоугольные пики приблизительно при  $45^\circ$ , типичные для аморфных сплавов.

Для определения соответствия между исходным элементным составом аморфных сплавов системы Fe-Cr-B экспериментально получены изображения образцов размером 100 мкм и проведен количественный анализ элементного состава выбранного образца с использованием сканирующего электронного микроскопа SEM - EVO MA 10 (Zeiss, Германия), изображения представлены на рисунке 9 ниже.

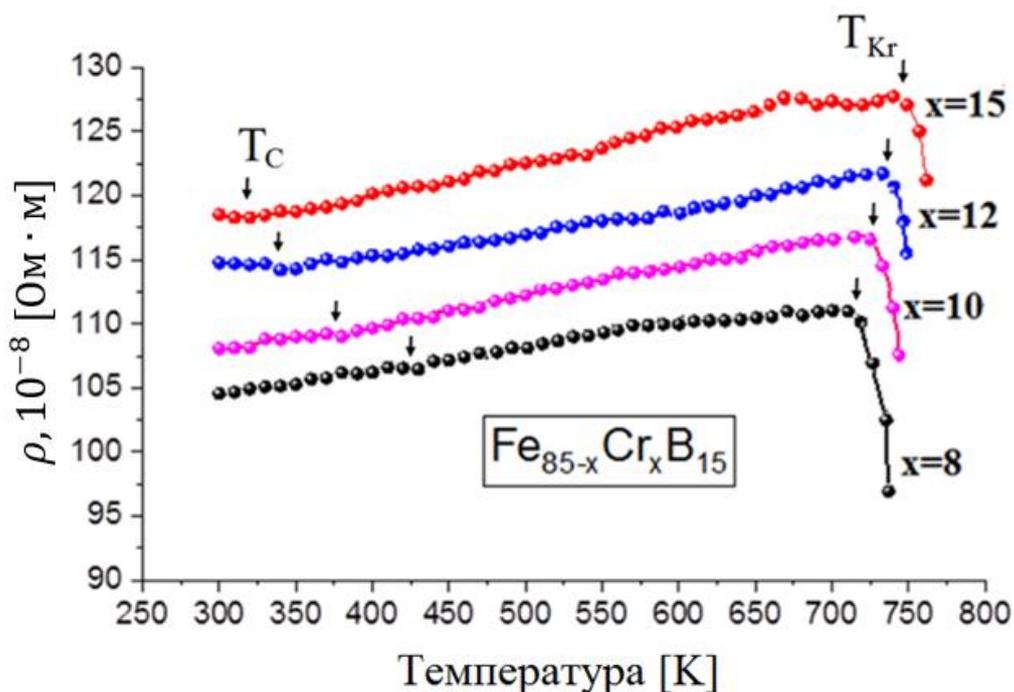


**Рис. 9.**  
Снимки, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), элементного состава сплавов, относящихся к аморфной системе FeCrB:  
а)  $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$ ,  
б)  $Fe_{73}Cr_{12}B_{15}$ ,  
в)  $Fe_{75}Cr_{10}B_{15}$   
г)  $Fe_{77}Cr_{8}B_{15}$

На рисунке 9 представлены четыре микроструктурные изображения, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) и результаты их энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX), по которым можно проанализировать состав исследуемых образцов.

На каждом графике по горизонтальной оси отложена энергия, а по вертикальной — интенсивность. Из полученных спектров видно, что в образцах присутствуют три основных элемента: Fe (железо), Cr (хром) и В (бор). На каждом графике показано процентное содержание в атомных единицах массы элементов. Полученные результаты подтверждают предоставленную производителями информацию о количественном соотношении элементов в образце.

Температурная зависимость удельного электросопротивления сплавов системы Fe-Cr-B в аморфном состоянии представлена на рисунке 10.

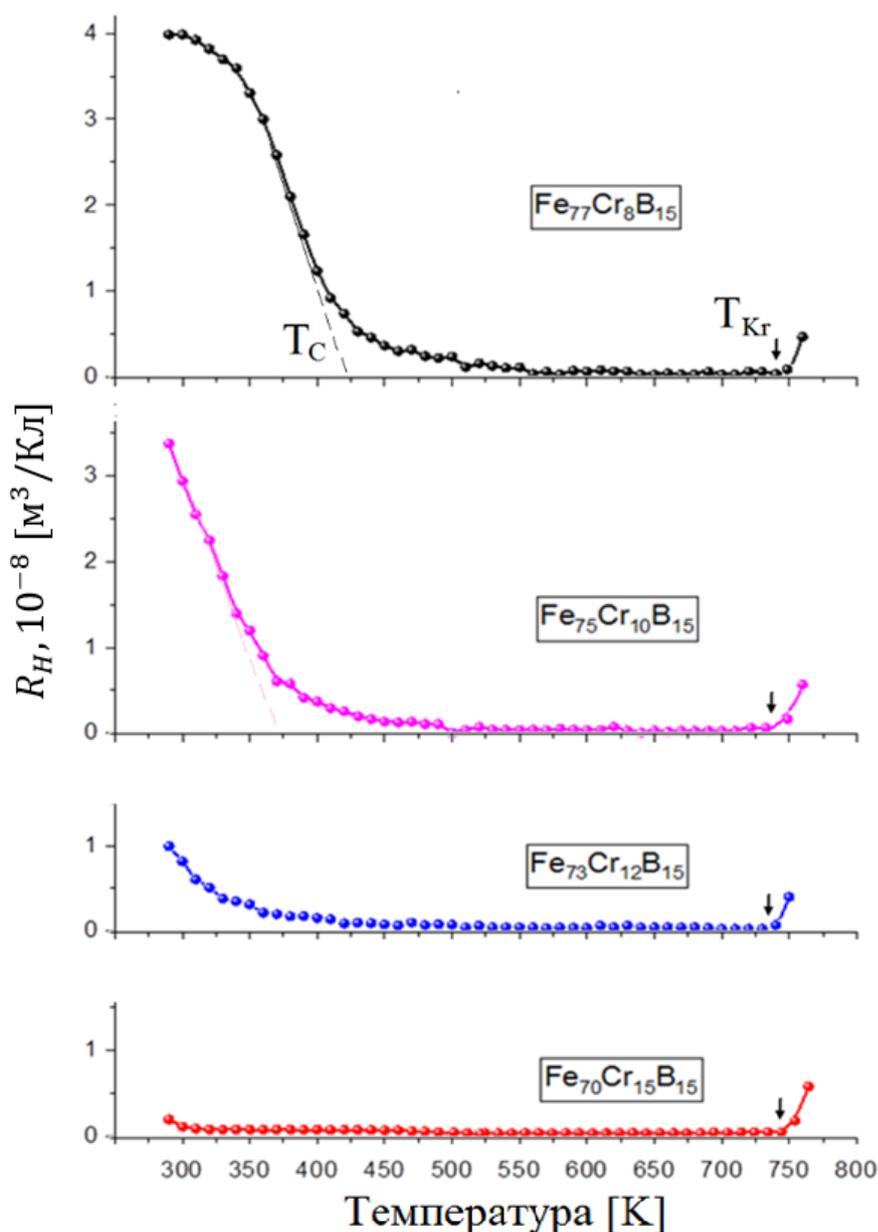


**Рис. 10. Температурная зависимость удельного электросопротивления сплавов системы Fe-Cr-B в аморфном состоянии**

Из рисунка видно, что для всех образцов удельное сопротивление слабо зависит от температуры. Практически во всех аморфных металлических сплавах на основе элементов группы железа удельное электрическое сопротивление  $\rho$  изменяется линейно от комнатной температуры до температуры кристаллизации, а температурный коэффициент сопротивления  $TКС - \partial\rho/\partial T$  принимает следующие значения: для аморфного сплава  $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$   $\partial\rho/\partial T=2,62\cdot 10^{-2}$  (мкОм·см)/К, для сплава  $Fe_{73}Cr_{12}B_{15}$   $\partial\rho/\partial T=2,45\cdot 10^{-2}$  (мкОм·см)/К, для образца  $Fe_{75}Cr_{10}B_{15}$   $\partial\rho/\partial T=2,23\cdot 10^{-2}$  (мкОм·см)/К, а для образца  $Fe_{77}Cr_8B_{15}$   $\partial\rho/\partial T=1,89\cdot 10^{-2}$  (мкОм·см)/К. Начальные значения удельного электросопротивления при комнатной температуре для образцов  $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$ ,  $Fe_{73}Cr_{12}B_{15}$ ,  $Fe_{75}Cr_{10}B_{15}$  и  $Fe_{77}Cr_8B_{15}$  составляют  $104\cdot 10^{-8}$  Ом·м,  $108\cdot 10^{-8}$  Ом·м,  $115\cdot 10^{-8}$  Ом·м и  $118\cdot 10^{-8}$  Ом·м соответственно.

Зависимость коэффициента Холла  $R_H$  аморфных сплавов Fe-Cr-B от температуры  $T$  с использованием метода Ван дер Пау представлена на рисунке 11.

Как следует из рисунка, коэффициент Холла в аморфном сплаве  $Fe_{77}Cr_8B_{15}$  уменьшается приблизительно линейно от комнатной температуры до 420 К. В следующем интервале 420–500 К температур он плавно уменьшается, постепенно приближаясь к нулевому значению, что обусловлено переходом аморфного сплава из ферромагнитного состояния в парамагнитное. В образце  $Fe_{75}Cr_{10}B_{15}$  коэффициент Холла линейен от комнатной температуры до 370 К. В следующем диапазоне температур 370–475 К он уменьшается приближаясь к нулевому значению, такая же ситуация наблюдалась в образцах  $Fe_{73}Cr_{12}B_{15}$  и  $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$ .

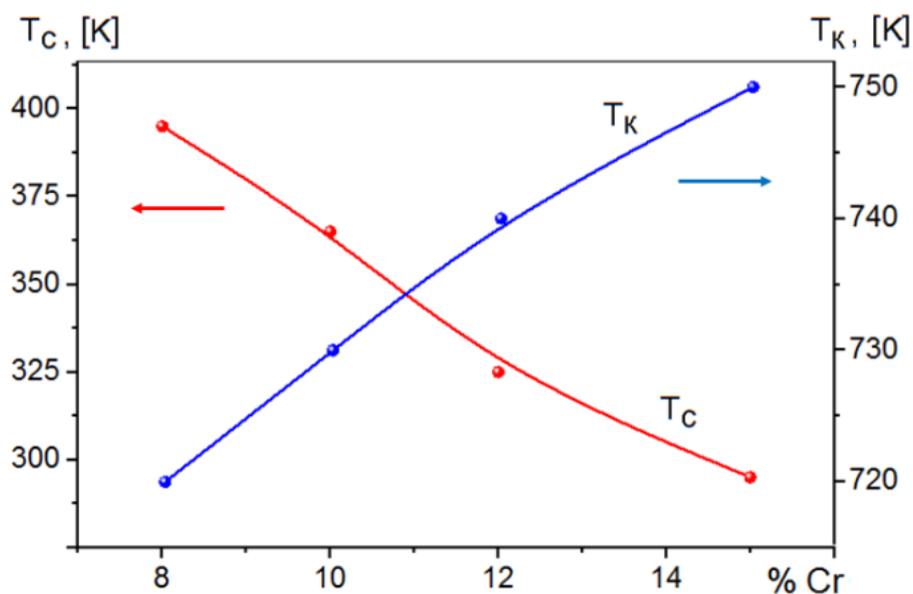


**Рис. 11.**  
Зависимость  
коэффициента  
Холла  $R_H$   
сплавов  
аморфной  
системы  
Fe-Cr-B от  
температуры  $T$

Продолжая график линейного убывания коэффициента Холла, начиная с комнатной температуры путем экстраполяции, видим, что температура Кюри

для образца  $\text{Fe}_{77}\text{Cr}_8\text{V}_{15}$  составляет 425 К. График зависимости коэффициента Холла от температуры показывает, что, начиная с температуры  $T=720\text{K}$ , наблюдается увеличение коэффициента Холла  $R_H$ . Начиная с этой температуры в образце наблюдается кристаллизация. Аналогичная тенденция наблюдается в образце  $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{10}\text{V}_{15}$ . Определено, что температура Кюри аморфного состояния для данного образца составляет 375 К, температура кристаллизации – 730 К, температура Кюри аморфного состояния для образца  $\text{Fe}_{73}\text{Cr}_{12}\text{V}_{15}$  составляет 335 К, температура кристаллизации – 740 К, а температура Кюри аморфного состояния для образца  $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{V}_{15}$  составляет 320 К, температура кристаллизации – 750 К.

Электрические и гальваномагнитные свойства исследуемых образцов измерялись от комнатной температуры до температуры начала кристаллизации.



**Рис. 12. Зависимость температуры кристаллизации  $T_K$  и температуры Кюри  $T_C$  сплавов аморфной системы  $\text{Fe}_{85-x}\text{Cr}_x\text{V}_{15}$  ( $x=8\div 15$ ) от концентрации хрома Cr**

Увеличение концентрации металлоидов в аморфных металлических сплавах, во-первых, уменьшает эффективное число носителей заряда, а во-вторых, увеличивает рассеивающий потенциал. В результате с ростом концентрации металлоида температура кристаллизации аморфных сплавов увеличивается.

С другой стороны, в аморфных ферромагнитных сплавах можно видеть, что температура Кюри уменьшается по мере увеличения концентрации металлов.

Температура Кюри и температура кристаллизации аморфных сплавов зависят от концентрации металлоидов. Экспериментальные результаты по температуре Кюри и температуре кристаллизации исследованных образцов представлены в таблице 5.

Таблица 5.

### Результаты температур Кюри и кристаллизации сплавов системы Fe-Cr-B

| Параметр   | Значение параметра в зависимости от содержания    |   |   |  |
|--|---|---|---|--|
|  | Fe <sub>70</sub> Cr <sub>15</sub> B <sub>15</sub> | Fe <sub>73</sub> Cr <sub>12</sub> B <sub>15</sub> | Fe <sub>75</sub> Cr <sub>10</sub> B <sub>15</sub> | Fe <sub>77</sub> Cr <sub>8</sub> B <sub>15</sub> |
| Температура Кюри<br>T <sub>C</sub> , [K]:          | 295   | 325   | 375   | 425  |
| Температура кристаллизации<br>T <sub>K</sub> , [K] | 750   | 740   | 730   | 720  |

При переходе образцов в кристаллическое состояние наблюдается уменьшение относительного электросопротивления  $\rho(T)$  с понижением температуры. Во всех образцах температурный коэффициент сопротивления в кристаллическом состоянии больше, чем в аморфном состоянии.

Аморфные сплавы образуются при быстром охлаждении, при этом атомы располагаются беспорядочно. В процессе нагрева эти внутренние неровности устраняются, в результате чего выделяется тепло и на графике наблюдается восходящий пик. Это явление непосредственно связано со структурными изменениями в твердой фазе.

Получена температурная зависимость удельной теплоемкости  $C_p$  аморфных сплавов Fe<sub>70</sub>Cr<sub>15</sub>B<sub>15</sub>, Fe<sub>73</sub>Cr<sub>12</sub>B<sub>15</sub>, Fe<sub>75</sub>Cr<sub>10</sub>B<sub>15</sub> и Fe<sub>77</sub>Cr<sub>8</sub>B<sub>15</sub>, относящихся к системе Fe-Cr-B на основе элементов группы железа, в диапазоне температур от комнатной до 1300 К.

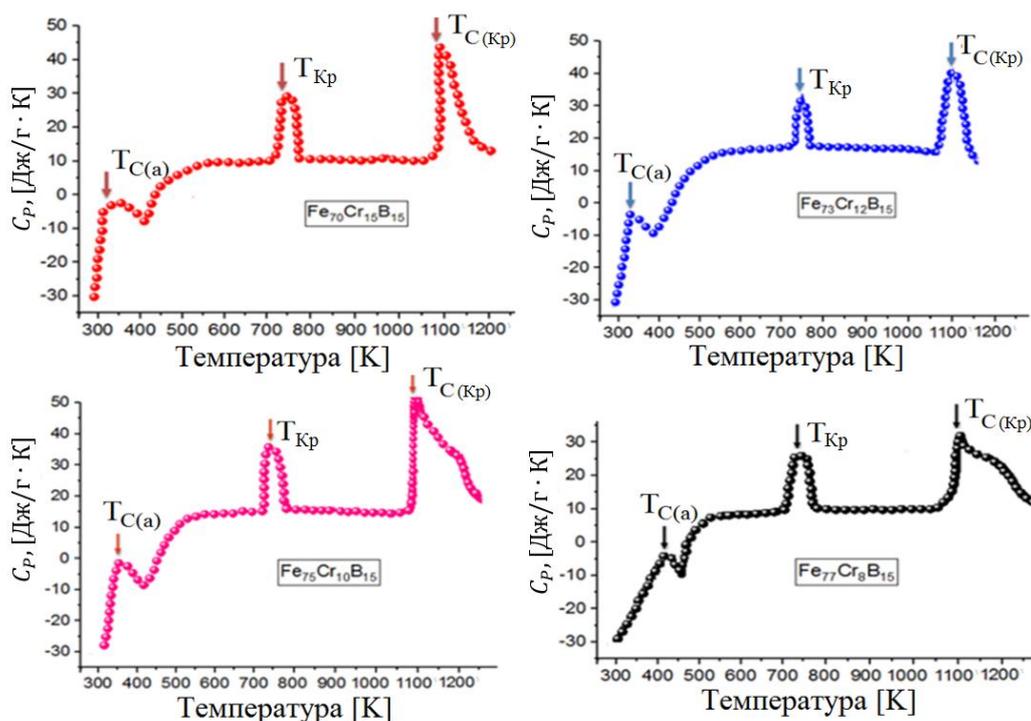


Рис. 13. Зависимость удельной теплоемкости  $C_p$  аморфных сплавов системы Fe-Cr-B в интервале температур от комнатной температуры до 1300 К

Используя результаты, представленные на рисунке 13, тепловые эффекты, т.е. изменения энтальпии, рассчитываются с помощью метода численного интегрирования площадей, ограниченных кривыми (метод трапеций). Значения тепловых эффектов для всех исследованных образцов представлены в таблице 6.

**Таблица 6.**  
**Значения  $\Delta H$  –изменения энтальпии сплавов системы Fe-Cr-B**

| Образец   | Тепловой эффект                         | Тепловой эффект                          | Тепловой эффект                           |
|---|---|--|---|
|   | $\Delta H_1$<br>[Дж/г]<br>(20 - 160 °С) | $\Delta H_2$<br>[Дж/г]<br>(445 - 480 °С) | $\Delta H_3$<br>[Дж/г]<br>(860 - 1100 °С) |
| Fe <sub>70</sub> Cr <sub>15</sub> B <sub>15</sub> | 447                                     | 674                                      | 3009                                      |
| Fe <sub>73</sub> Cr <sub>12</sub> B <sub>15</sub> | 571                                     | 791                                      | 4616                                      |
| Fe <sub>75</sub> Cr <sub>10</sub> B <sub>15</sub> | 668                                     | 870                                      | 5219                                      |
| Fe <sub>77</sub> Cr <sub>8</sub> B <sub>15</sub>  | 796                                     | 922                                      | 5658                                      |

С использованием данных по температурной зависимости относительного электросопротивления и коэффициента Холла, по формуле (1) рассчитан эффективный параметр спин-орбитального взаимодействия  $\lambda_{SO}$  в ферромагнитных аморфных сплавах системы Fe-Cr-B.

Результаты расчета приведена в таблице 7.

**Таблица 7**  
**Значения коэффициента Холла  $R_H$ , удельного электросопротивления  $\rho$  и эффективного параметра спин-орбитального взаимодействия  $\lambda_{SO}$  для ферромагнитного состояния сплавов системы Fe-Cr-B**

| Т (К) | Fe <sub>77</sub> Cr <sub>8</sub> B <sub>15</sub> |                                  |                                       | Fe <sub>75</sub> Cr <sub>10</sub> B <sub>15</sub> |                                  |                                       |
|-------|--|----------------------------------|---------------------------------------|---|----------------------------------|---------------------------------------|
|       | $R_H \cdot 10^{-8}$<br>[ $\frac{M^3}{Kл}$ ]      | $\rho \cdot 10^{-8}$<br>[Ом · м] | $\lambda_{SO} \cdot 10^{-14}$<br>[Дж] | $R_H \cdot 10^{-8}$<br>[ $\frac{M^3}{Kл}$ ]       | $\rho \cdot 10^{-8}$<br>[Ом · м] | $\lambda_{SO} \cdot 10^{-14}$<br>[Дж] |
| 300   | 4  | 104                              | 17.7                                  | 3   | 108                              | 12.3                                  |
| 320   | 3.8  | 104.5                            | 16.6                                  | 2.2   | 108.2                            | 9                                     |
| 340   | 3.5  | 105                              | 15.2                                  | 1.4   | 108.5                            | 5.7                                   |
| 360   | 3  | 105.5                            | 13                                    | 0.9   | 109                              | 3.63                                  |
| 380   | 2.1  | 106                              | 8.6                                   | 0.5   | 109.3                            | 2                                     |
| 400   | 1.2  | 106                              | 5.1                                   |   |                                  |                                       |
| 420   | 0.7  | 106.5                            | 2.9                                   |   |                                  |                                       |
| 440   | 0.4  | 107                              | 1.6                                   |   |                                  |                                       |

| Т (К) | Fe <sub>73</sub> Cr <sub>12</sub> B <sub>15</sub> |                                  |                                       | Fe <sub>70</sub> Cr <sub>15</sub> B <sub>15</sub> |                                  |                                       |
|-------|---|----------------------------------|---------------------------------------|---|----------------------------------|---------------------------------------|
|       | $R_H \cdot 10^{-8}$<br>[ $\frac{M^3}{Kл}$ ]       | $\rho \cdot 10^{-8}$<br>[Ом · м] | $\lambda_{SO} \cdot 10^{-14}$<br>[Дж] | $R_H \cdot 10^{-8}$<br>[ $\frac{M^3}{Kл}$ ]       | $\rho \cdot 10^{-8}$<br>[Ом · м] | $\lambda_{SO} \cdot 10^{-14}$<br>[Дж] |
| 300   | 0.8   | 114.8                            | 2.9                                   | 0.16  | 118.5                            | 0.54                                  |
| 320   | 0.5   | 114.85                           | 1.8                                   | 0.12  | 118.7                            | 0.4                                   |
| 340   | 0.35  | 114.9                            | 1.2                                   | 0.1   | 119                              | 0.33                                  |
| 360   | 0.1   | 115                              | 0.72                                  |   |                                  |                                       |

Из таблицы видно, что в ферромагнитном состоянии эффективный параметр спин-орбитального взаимодействия уменьшается с ростом температуры. По-видимому, это связано с увеличением степени беспорядка в магнитной подсистеме сплавов при повышении температуры.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

1. Экспериментально исследована температурная зависимость электросопротивления, коэффициента Холла и удельной теплоемкости сплавов системы Fe-Ni-Si-C и Fe-Cr-B от аморфного состояния образцов до точки перехода в кристаллическое состояние.

2. Изучено влияние металлоидов (Si+C) на структуру, термическую стабильность и кинетические свойства образцов в системе Fe-Ni-Si-C. Эксперименты показали, что с увеличением концентрации металлоидов в исследуемых аморфных сплавах эффективное значение коэффициента Холла и температура кристаллизации увеличиваются, а температура Кюри уменьшается.

3. Изменение концентрации металлоидов также влияет на магнитные свойства аморфных сплавов, то есть с увеличением концентрации Cr в аморфных сплавах Fe-Cr-B абсолютная величина намагниченности и температура Кюри уменьшаются, а температура кристаллизации увеличивается. Увеличение скорости нагрева не влияет на температуру Кюри, но увеличивает интервал между температурами начала и конца кристаллизации.

4. Получено, что с увеличением концентрации металлоида в образцах абсолютное значение удельного электросопротивления увеличивается, а температурный коэффициент сопротивления уменьшается. Увеличение концентрации металлоидов уменьшает эффективное число носителей в образце и увеличивает сопротивление, что соответствует критерию Муиджи.

5. Показано, что для аморфных сплавов при  $T < T_c$  выполняется соотношение  $R_s = \alpha\rho + b\rho^2$  ( $\rho$  — удельное электрическое сопротивление), что подтверждает справедливость теории Ведяева и Грановского для аморфных сплавов.

6. Установлено, что температура Кюри  $T_c$  и температура кристаллизации  $T_K$ , определенные по температурной зависимости теплоемкости аморфных сплавов систем Fe-Ni-Si-C и Fe-Cr-B, хорошо согласуются с значениями, определенными по температурной зависимости относительного электросопротивления и коэффициента Холла. Также по зависимости удельной теплоемкости  $C_p(T)$  от температуры определялось изменение теплового эффекта-энтальпии, происходящее в образцах. Объяснено образование нанокристаллических доменов в образцах при переходе из аморфного в кристаллическое состояние.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARD OF THE SCIENTIFIC DEGREE OF  
DOCTOR OF PHILOSOPHY PhD.03/30.12.2019.FM.02.04 SAMARKAND  
STATE UNIVERSITY NAMED AFTER SHAROF RASHIDOV**

---

**SAMARKAND STATE UNIVERSITY NAMED AFTER  
SHAROF RASHIDOV**

**KHOMITOV SHERZOD ASATILLO UGLI**

**STUDY OF ELECTRICAL, MAGNETIC AND THERMAL PROPERTIES  
OF ALLOYS BASED ON TRANSITION 3D METALS**

**01.04.09 – Physics of magnet phenomena**

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

**Samarkand – 2025**

The theme of dissertation of doctor of philosophy (PhD) was registered with the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under No. B2024.4.PhD/FM1203.

Dissertation has been prepared at the Samarkand state university named after Sharof Rashidov. The abstract of the dissertation is posted in three languages (uzbek, russian, english (resume)) on the website (www.samdu.uz) and the "Ziyonet" information and educational portal (www.ziyonet.uz).

**Scientific supervisor:** **Razhabov Rustam Mustafоеvich**  
candidate of Physical and Mathematical Sciences, docent

**Official opponents:** **Sharipov Mirzo Zokirovich**  
doktor of Physical and Mathematical Sciences, professor

**Usarov Uktam Turatovich**  
candidate of Physical and Mathematical Sciences,  
professor

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

Dissertation defense will be held on «12» 06 2025 at 11<sup>30</sup> at the meeting of Scientific Council number PhD.03/30.12.2019.FM.02.04 at Samarkand State University. (Address: University Boulevard 15, Samarkand, 140104, Uzbekistan, Ph.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; fax: (99866) 239-11-40; e-mail: rektor@samdu.uz. cabinet 114, ground floor, Institute of Engineering Physics, Samarkand State University).

Dissertation is possible to review in Information Resource Centre at Samarkand State University (is registered №46) (Address: University Boulevard 15, Samarkand, 140104, Uzbekistan, Ph.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; fax: (99866) 239-11-40).

Abstract of dissertation sent out on «21» 05 2025 year  
(Mailing report № 46 on «21» 05 2025 year).



**M.Kh.Ashurov**  
Chairman of scientific council  
on award of scientific degrees,  
DSc in physics and mathematics, academician

  
**R.M.Rajabov**  
Scientific secretary of scientific council  
on award of scientific degrees,  
CSc in physics and mathematics, docent

  
**D.I.Semenov**  
Chairman of scientific seminar under scientific  
council on award of scientific degrees,  
DSc in physics and mathematics, docent

## INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

**The purpose of the research** is to obtain experimental results of electrical, magnetic, galvanomagnetic and thermal properties of the alloy system based on 3d transition metals in the amorphous state and to analyze these properties in the ferromagnetic and paramagnetic region.

### **Research objectives:**

Obtaining experimental results on the temperature dependences of the specific electrical resistance, Hall coefficient and specific heat capacity of Fe-Ni-Si-C and Fe-Cr-B alloys from the amorphous state of the samples to the point of transition to the crystalline state;

study of the effect of metalloid concentration on the structure, thermal stability and kinetic properties of the studied amorphous alloys;

study of electrical, galvanomagnetic and thermal properties of ferromagnetic amorphous alloys of 3d metals in the region of transition to the crystalline state;

study of temperature dependences of the specific electrical resistance, Hall coefficient and specific heat capacity of Fe-Ni-Si-C and Fe-Cr-B alloys in the amorphous state in the region of the ferromagnet - paramagnet phase transition.

**The objects of the research.** The objects of the study were selected as materials amorphous alloys  $\text{Fe}_{67.3}\text{Ni}_{18.2}\text{Si}_{5.1}\text{C}_{9.4}$ ,  $\text{Fe}_{68.5}\text{Ni}_{19.1}\text{Si}_{4.9}\text{C}_{7.5}$ ,  $\text{Fe}_{70.5}\text{Ni}_{18.3}\text{Si}_{5.0}\text{C}_{6.2}$  and  $\text{Fe}_{71.6}\text{Ni}_{18.7}\text{Si}_{5.0}\text{C}_{4.7}$  related to the Fe-Ni-Si-C system based on iron group elements, and also  $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ ,  $\text{Fe}_{73}\text{Cr}_{12}\text{B}_{15}$ ,  $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{10}\text{B}_{15}$  and  $\text{Fe}_{77}\text{Cr}_8\text{B}_{15}$  related to the Fe-Cr-B system.

**The subject of the research** is characterized by a comprehensive study of the electrical, magnetic, galvanomagnetic and thermal properties of alloys based on 3d metals, establishing the relationship between them and interpreting this relationship from the standpoint of the theory of the anomalous Hall effect, and also assessing the coefficients of spin-orbit and exchange interactions based on experimental results.

**Research methods.** The following methods were used to measure various properties of amorphous alloys based on iron group elements: X-ray spectral analysis (EDX) for elemental composition, morphological analysis of atomic arrangement using the scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction spectroscopy to study the structural state of the samples, the Van der Pauw method for measuring relative electrical resistance and the Hall effect, the calorimetric method for measuring the heat capacity of the samples, and the vibrating magnetometer method for measuring magnetization.

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

For the first time, the complex of experimental data on the temperature dependences of the specific electrical resistance, Hall coefficient and specific heat capacity of Fe-Ni-Si-C and Fe-Cr-B alloys from the amorphous state of the samples to the transition point to the crystalline state was obtained.

The correlations of temperature dependences of specific electrical resistance, Hall coefficient and specific heat capacity of alloys of the Fe-Ni-Si-C and Fe-Cr-B systems in the amorphous state were studied and a second-order ferromagnet –

paramagnet phase transition was revealed.

The effect of metalloids (Si + C) on the structure, thermal stability and kinetic properties of Fe-Ni-Si-C samples was studied. It was shown that with an increase in the concentration of metalloids in the studied amorphous alloys, the effective value of the Hall coefficient and the crystallization temperature increase, and the Curie temperature decreases. Based on the relationship between the anomalous Hall coefficient and specific electrical resistance, and also the effect of metalloid concentration on the absolute value and thermal coefficient of resistance in amorphous alloys, it is shown that the Vedyayev-Granovsky theory and the Muigi correlation are valid in the amorphous state.

Based on the experimentally obtained results of the dependence of the specific heat capacity  $C_p(T)$  in amorphous alloys of the Fe-Ni-Si-C and Fe-Cr-B systems, it is shown that during the transition from the amorphous state to the crystalline state, nanocrystalline domains are formed.

#### **Implementation of research results.**

The results of the study of the structure, morphology and electrical properties of amorphous tapes of the Fe-Ni-Si-C system were used to interpret the experimental data in the course of studies carried out within the framework of project № FZGM-2023-0006 (Act of the Voronezh State Technical University dated 01/20/2025, Russian Federation). Based on the obtained results, the thermal stability of thin-film nanocomposite materials based on iron group elements was explained.

The results of the temperature dependence of the heat capacity of amorphous ferromagnetic alloys in the dissertation were used to explain the thermal properties of organic substances (Act of the Technical University of Tajikistan named after M.S. Osimii dated 02/14/2025). The use of scientific results made it possible to determine the thermal effects in these substances.

**Approbation of the research results.** Results of the research work have been discussed at 8 international and 9 republican scientific and practical conferences.

**Publication of research results.** In total, 24 scientific works were published on the topic of the research, including 7 scientific articles (4 republican and 3 foreign journals on base of Scopus) were published in the list of scientific publications recommended for publication of the main scientific results of dissertations of the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan.

**The structure and volume of the dissertation.** The dissertation consists of introduction, four chapters, conclusion, two appendices and list of used literature. The volume of the dissertation is 111 pages, including 41 figures and 8 tables.

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

**I bo'lim ( I часть; I part)**

1. I.Subhonqulov, B.Amonov, G'.Bakaev, Sh.A.Xomitov "Yuqori temperaturalarda amorf qotishmalarning magnitlanishi va uni o'lchash usuli" SamDU ilmiy axborotnomasi 2017-yil 1-son. 177-181 bet.

2. O.K.Kuvandikov, I.Subxankulov, D.X.Imamnazarov, Sh.A.Xomitov, G.S.Bakaev "Изучение природы спиновых волн в аморфных ферромагнитных сплавах" СамДУ илимий axborotnomasi 2021 йил 3-сон. 114-118 бет. DOI: <https://doi.org/10.59251/2181-1296.v3.1271.1211>

3. O.K.Kuvandikov, I.Subxankulov, D.H.Imamnazarov, Sh.A.Khomitov "The nature of exchange interaction in amorphous alloys based on metals of the iron group with metalloids" Metallofizika i noveyshie texnologii. Ukraina. Kiev 2022, vol. 44, No. 7, pp. 823–829. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.44.07.0823> (Scopus)

4. O.Kuvandikov, I.Subxankulov, R.M.Rajabov, Sh.A.Xomitov, G.S.Bakaev "Электрические, гальваномагнитные и магнитные свойств в аморфных сплавах на основе переходных металлов" SamDU ilmiy axborotnomasi 2023-yil 3-son 192-195 bet.

5. O. Kuvandikov, I. Subkhankulov, R. M. Rajabov, Sh. A. Khomitov "The Hall Effect in Amorphous and Crystalline Fe<sub>60</sub>Co<sub>20</sub>Si<sub>8</sub>B<sub>12</sub> and Fe<sub>58</sub>Co<sub>20</sub>Si<sub>12</sub>B<sub>10</sub> Ferromagnetic Alloys" Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2024, Vol. 88, No. 11, pp. 1836–1842. DOI: <https://doi.org/10.1134/S106287382470833X> (Scopus)

6. O. Kuvandikov, N. S. Hamraev, R. M. Razhabov, I. Subkhankulov, Sh. A. Khomitov, and D. H. Imamnazarov "Thermal Characteristics of Amorphous Fe–Ni–Si–C Alloys" Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2024, Vol. 88, No. 12, pp. 2056–2061. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1062873824708675> (Scopus)

7. O.Quvondiqov, I.Subhonqulov, R.M.Rajabov, N.S.Hamrayev, Sh.A.Xomitov Fe-Cr-B sistemasidagi Fe<sub>73</sub>Cr<sub>12</sub>B<sub>15</sub> va Fe<sub>75</sub>Cr<sub>10</sub>B<sub>15</sub> amorf qotishmalarning elektr, magnit va galvanomagnit xossalari. SamDU ilmiy axborotnomasi 2024-yil 3-son (145/1) 5-11 bet.

**II bo'lim ( II часть; II part)**

1. Subhonqulov I., Xomitov Sh.A. "Temir guruhi elementlari asosidagi amorf qotishmalarning galvanomagnit va magnit xossalari" "Uzluksiz ta'lim tizimida fizikani o'qitishni takomillashtirishning dolzarb muammolari" mavzusidagi respublika ilmiy-amaliy anjumani materiallari to'plami. GulDU-2017 yil. 29-aprel. 147-151 bet.

2. I.Subhonqulov, Sh.Xomitov, C.Narzullaev "Magnitlanishni vibratsion (tebranuvchi magnitometr) usulida o'rganish" 2019 yil «Faol investitsiyalar va

ijtimoiy rivojlanish yili»ga bag'ishlangan «Fan va ta'lim-tarbiyaning dolzarb masalalari» mavzusidagi Respublika ilmiy-nazariy anjuman materiallari 4-bo'lim Nukus 2019-yil. 1-aprel. 98-100 bet.

3. Subhonqulov I., Baqoev G'.S., Ikromov A.Q., Xomitov Sh.A. "Amorf metall qotishmalarining elektr va magnit xususiyatlariga qizdirish tezligi va metalloidlarning konsentratsiyasini ta'siri" "Kondensirlangan holatlar fizikasining zamonaviy muammolari" mavzusidagi II-Respublika ilmiy-amaliy anjumani tezislar to'plami. Buxoro-2019 yil. 04-may. 57-bet.

4. I.Subhonqulov, Sh.A.Xomitov, S.B.Abduvasiyev "Fe<sub>85-x</sub>Cr<sub>x</sub>B<sub>15</sub>(x=8:15) amorf qotishmalar sistemasining transport xossalari" "Oriental renaissance: Innovative, educational, natural and social sciences" 2022-yil yanvar VOLUME 2 | ISSUE 1. 285-287 bet.

5. Субхонкулов И., Хомитов Ш.А., Бакаев Г.С. "Аморфные сплавы на железо-никелевой основе с молибденом и бором" Международной научно – практической конференции "Ломоноовские чтения" Душанбе. 2022 г. 29-30 апрель. 204-208 бет.

6. S.B.Abduvasiyev, I.Subhonqulov, Sh.A.Xomitov "Fe<sub>85-x</sub>Cr<sub>x</sub>B<sub>15</sub> (x=8,10,12,15 at%) Amorf qotishmalar sistemasi magnitlanishni temperaturaga va qizdirish tezligiga bog'liqligi" Yosh olimlar va fizik talabalarning II respublika ilmiy anjumani (YOFTRIA- II) materiallari. Toshkent 2022 yil, 20-21 may 270-272 bet.

7. О.Кувандиков, Р.М.Ражабов, Д.Имамназаров, Ш.А.ХОМИТОВ "Термические свойства аморфных сплавов на основе железа" «Kondensirlangan moddalar va muhandislik fizikasi muammolari» mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy konferensiya materiallari. Samarqand. 25-26 noyabr, 2022 yil. 11-14 bet.

8. О.Кувандиков, I.Subkhankulov, N.S.Khamraev, R.M.Razhabov, D.Kh.Imamnazarov, Sh.A.Khomitov "Thermal properties of amorphous FeNiSiC alloys" Samarkand International Symposium on Magnetism 2 – 6 July, 2023. 178 p.

9. О.Кувандиков, I.Subkhankulov, R.M.Razhabov, Sh.A.Khomitov G.S.Bakaev "Hall effect in amorphous ferromagnetic alloys" Samarkand International Symposium on Magnetism 2 – 6 July, 2023. 313 p.

10. Субхонкулов И. Дусмуродов Г. Хомитов Ш. "Связь между физическими свойствами аморфных Fe<sub>58</sub>Co<sub>20</sub>Si<sub>12</sub>B<sub>10</sub> и Fe<sub>60</sub>Co<sub>20</sub>Si<sub>8</sub>B<sub>12</sub> сплавов" Mikro va nanotexnologiya yangi materiallar olishning zamonaviy holati va istiqbollari mavzusidagi Xalqaro konferensiya. Qarshi. 30-31 oktyabr 2023 yil. 106-109 bet.

11. Ражабов Р.М., Субхонкулов И., Хомитов Ш.А. "Термические свойства в аморфном Fe-Ni-Si-C сплавов" Mikro va nanotexnologiya yangi materiallar olishning zamonaviy holati va istiqbollari mavzusidagi Xalqaro konferensiya. Qarshi. 30-31 oktyabr 2023 yil. 180-183 bet.

12. О.Кувандиков, I.Subhonqulov, N.S.Намраев, R.M.Ражабов, Sh.A.Хомитов "Fe<sub>85-x</sub>Cr<sub>x</sub>B<sub>15</sub> (x = 8 ÷ 15) amorf qotishmalarining elektr, magnit va galvonomagnit xossalari" Научной конференции «современные

проблемы физики конденсированного состояния» - 2024. Издательство «БУХОРО НАИП» 2024-yil 95-97 bet.

13. O.Kuvandikov, I.Subkhankulov, N.S.Hamraev, R.M.Razhabov, Sh.A.Khomitov, O.Z.Turgunov “Electrical, magnetic and galvanomagnetic properties of  $Fe_{85-x}Cr_xB_{15}$  ( $x = 8 \div 15$ ) amorphous alloys” The third international forum “PHYSICS – 2024” Samarkand. 23-25 April 2024. 109-bet.

14. И.Субханкулов, Р.М.Ражабов, Ш.А.Хомитов «Электрические и гальваномагнитные свойства аморфных сплавов Fe-Ni-Si-C» “Kondensirlangan holat fizikasining dolzarb muammolari va yangi yuqori texnologiyalar” respublika ilmiy-amaliy anjumani. Samarqand 2024 yil 29 – 30 noyabr. 15-18 bet.

15. О.Кувандиков, Р.М.Ражабов, И.Субханкулов, Ш.А.Хомитов, А.И.Самиев «Температурных зависимостей теплоемкости аморфных ферромагнитных сплавов» “Kondensirlangan holat fizikasining dolzarb muammolari va yangi yuqori texnologiyalar” respublika ilmiy-amaliy anjumani. Samarqand 2024 yil 29 – 30 noyabr. 161-163 bet.

16. Sh.A.Xomitov “O‘tkinchi 3d elementlari asosidagi metall qotishmalarning elektr va galvanomagnit xossalarni o‘lchashning Van der Pau usuli” “Kondensirlangan holat fizikasining dolzarb muammolari va yangi yuqori texnologiyalar” respublika ilmiy-amaliy anjumani. Samarqand 2024 yil 29 – 30 noyabr. 43-45 bet.

17. О. Кувандиков, И.Субханкулов, Н.С.Хамраев, Р.М.Ражабов, Ш.А.Хомитов “Транспортные свойства аморфных сплавов  $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$  и  $Fe_{77}Cr_8B_{15}$  в системы Fe-Cr-B” Международная конференция «Физические и технические науки в пространстве СНГ: проблемы и перспективы развития» 29-30 ноября. Душанбе 2024 года. 73-77ст.

Avtoreferat Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universitetining “Ilmiy axborotnoma”  
jurnali tahririyatida tahrirdan o‘tkazilib, o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlari o‘zaro  
muvofiqlashtirildi (13.05.2025-yil).

Bosmaxona tasdiqnomasi:



4268

2025-yil 14-mayda bosishga ruxsat etildi:  
Ofset bosma qog‘ozi. Qog‘oz bichimi 60x84<sub>1/16</sub>.  
“Times new roman” garniturasini. Ofset bosma usuli.  
Hisob-nashriyot t.: 3,6. Shartli b.t. 2,5.  
Adadi 100 nusxa. Buyurtma №14/05.

---

SamDCHTI tahrir-nashriyot bo‘limida chop etildi.  
Manzil: 140104, Samarqand sh., Bo‘stonsaroy ko‘chasi, 93.