

**ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ
ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ
ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ**

ХУДОЙҚУЛОВ ИЛЁС ХОЛМУРАДОВИЧ

**АВТО- ВА ТЕРМОЭЛЕКТРОН ЭМИССИЯСИ ШАРОИТЛАРИДА ВАКУУМ-
ЁЙ РАЗРЯДИ КАТОД ДОҒЛАРИДАГИ ЖАРАЁНЛАР**

01.04.04 – Физик электроника

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PHD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент-2023

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)
диссертацияси автореферати мундарижаси
Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)
По физика-математическим наукам
Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)
on physical-mathematical sciences**

Худойқулов Илѐс Холмурадович

Авто- ва термоэлектрон эмиссияси шароитларида вакуум-ѐй разряди катод доғларидаги жараѐнлар..... **3**

Худойқулов Илѐс Холмурадович

Процессы в катодном пятне вакуумно-дугового разряда в условиях авто- и термоэлектронной эмиссии..... **21**

Khudoykulov Ilyos Kholmuradovich

Processes in the cathode spot of a vacuum-arc discharge under conditions of auto-and thermionic emission..... **42**

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works..... **45**

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2017.3.PhD/FM117 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация А.У. Арифов номидаги Ион плазма ва лазер технологиялари институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус ва инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида (www.iplt.uz) ҳамда «ZiyoNet» ахборот-таълим порталида (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Ашуров Хатам Бахронович
техника фанлари доктори, профессор

Расмий опонентлар:

Максимов Сергей Евлантьевич
физика-математика фанлари доктори

Камардин Алексей Иванович
физика-математика фанлари номзоди

Етакчи ташкилот

Тошкент давлат техника университети

Диссертация химояси Ион-плазма ва лазер технологиялари институти ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 рақамли илмий кенгашнинг 2023 йил «27» 06 соат 14³⁰ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 33-уй. Тел./факс: (99871) 262-32-54, e-mail: info@iplt.uz, Ион-плазма ва лазер технологиялари институти мажлислар зали).

Диссертация билан Ион-плазма ва лазер технологиялари институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (5 рақами билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 33-уй. Тел: (99871) 262-31-69.)

Диссертация автореферати 2023 йил «16» 06 куни тарқатилди.
(2023 йил «16» 06 даги 5 рақамли реестр баённомаси)



Х.Б.Ашуров

Илмий даража берувчи Илмий кенгаш раиси, техника фанлари доктори, профессор

И.Д.Ядгаров

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

Б.Е.Умирзаков

Илмий даража берувчи Илмий кенгаш раиси ф-м.ф.д., профессор с.н.с.

Диссертация мавзусининг дозарблиги ва зарурлиги. Ҳозирги вақтда вакуумдаги ёй разрядни ўрганишга бўлган қизиқиш сиртда турли қопламалар қоплаш, металл намуналарни сиртида содир бўладиган қатламларга турли бўлинишларни уларнинг олдини олиш мақсадида сиртни қайта ишлаш ва тозалашларда ишлатиладиган қурилмаларда ундан кенг фойдаланилаётганлиги, шунингдек ион манбалари ва электр токи коммутаторларида кенг қўлланилиши билан баҳоланади. Бу жараёнларнинг асосида ҳам катод сиртига таъсир, ҳам вакуумли ёй разрядидаги катод доғларининг катод материалининг плазмали оқимлари шаклланишидаги кенг энергетик имкониятлар яратади.

Сўнгги йилларда юқори фойдаланиш имкониятларига эга бўлган инструментлар, коррозияга, металл намуналар сирт қатламларининг коррозияга, емирилишларга чидамлилигини оширишга йўналтирилган қайта ишлаш ва ҳимоя қатламларини ҳосил қилиш ва қайта ишлашнинг самарали методларини ишлаб чиқиш ва ривожлантириш катта эътибор қаратилмоқда. Бу масалаларни ҳал қилишда (ечишда) кимёвий, физикавий ва айниқса вакуумли ёй разрядига асосланган ион-плазмали методлар етакчи роль ўйнайди.

Маҳсулот (катод) юзасига ион-плазмавий вакуум-ёй разряди таъсирини шакллантириш, шунингдек, катод материални қайта ишлаш, қоплаш учун ион ва ион-плазма оқимларини ҳосил қилишнинг янги усуллари ва технологияларини яратиш ва техник вазифа - ионларнинг ҳосил бўлиш жараёнларини, вакуум ёйи разряднинг катод плазмасида уларнинг энергия параметрларини, шунингдек, унинг сирт қатламларига таъсир қилиш характери ўрганиш муҳим аҳамият касб этади. Мураккаб геометрияга эга металл қувурли маҳсулотларнинг ички сиртини қайта ишлаш ва қоплашни таъминлайдиган техник имкониятларни ўрганиш алоҳида аҳамиятга эга.

Ушбу физикавий ва катод электроникаси методларини ишлаб чиқиш учун ишончли ахборотларни олиш муҳим ва долзарб муаммо ҳисобланади. Вакуумли ёй разряди соҳасида олинган илмий натижалар ҳам фан учун, ҳам корпускуляр вакуум технологиялари учун долзарб ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикасида истиқболли фундаментал ва амалий тадқиқотлар йўналишларини, хусусан янги наноматериаллар яратиш, уланинг фундаментал физик хусусиятларини ўрганиш ва олинган тадқиқот натижаларини амалиётда қўллашни ривожлантиришга катта эътибор қаратилмоқда.

Ушбу диссертация маълум даражада Ўзбекистон Республикаси Президентининг «2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг бешта устувор йўналиши бўйича Ҳаракатлар стратегиясини амалга ошириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли фармони ҳамда «Фанлар академияси фаолияти, илмий-тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги 2017 йил 17 февралдаги № 4ПҚ-2789-сонли қарори доирасида кўзда тутилган вазифаларни бажаришга хизмат қилади.

Диссертациянинг Республика фан-техника тараққиётининг устувор йўналишларига мувофиқлиги. Диссертация Ўзбекистон Республикаси фан ва техникасини ривожлантиришнинг устувор йўналишига мувофиқ амалга оширилди: «энергия ва энергия ресурс тежамкорлик; замонавий электроника; микроэлектроника; фотоника; электрон қурилмаларини ривожлантириш» каби устувор йўналишлар доирасида амалга оширилган

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий тадқиқотлар шарҳи. Вакуумдаги ион-плазмали ва ёй разряди технологиялари кўп йиллардан бери жадал тадқиқ қилинмоқда. 1990 йилда Миллер томонидан тузилган вакуум разряди бўйича библиография 4250 номдаги ишларни ўз ичига олади, лекин ёй разрядининг табиатига ҳанузгача тўла тушуниб етилмаган. Ушбу муаммоларнинг ечими устида кўплаб машҳур олимлар: Комптон, Вуд, Штарк, Холл, Лэнгмюр, Фаулер, Милликен, Дайк, Оппенгеймер, Штенбек, Ромпе ва бошқалар иш олиб боришган ва олиб боришмоқда. Ўтган асрнинг 30-йилларида вакуумли ёйга таъриф берди – бу шундай газ разрядики, етарлича кичик катод потенциал тушувида металл катод атомлари ионлашиш потенциали тартибида бўлади. Танберг (1930 г.) катод

ёйига ёй токига пропорционал бўлган куч таъсир қилишини кўрсатиб берди, яъни $F=K_T \cdot I$. Кимблин (1971г.) эса ёйдаги ионлар токи $I_i=K_K \cdot I$ боғланишга эга эканлигини орқали аниқлади. Даалдер (1976 г.) вакуум ёйи содир бўладиган аниқ белгиланган t вақтда катодга берилмайдиган энергия $W=K_R I$ ни ташкил этишини аниқлади.

Вакуум ёйи назариясининг ҳозирги ҳолати Г. Эккер томонидан ва анод ҳодисалари Дж. Добайнлар томонидан, вакуум техника ҳолати эса ўрганилди. А. Гринвуд томонидан ўрганилди. Лекин уларнинг натижаларини баҳолашда бир-бирига қарама-қаршиликлар мавжуд. Дж. Фаррелл, Г. Эккер, ва Л. Харрисларнинг ишларида катод доғидаги ток зичликлари тадқиқоти натижалари келтирилган. РФА академиги Г.А.Месяц Томск политехника университетида, ва шунингдек РФАнинг СО юқори оқим электроника ва РФА УрБ электрофизика Институту ходимлари билан биргаликда катод доғларидаги портлаш эмиссиясини –суюқ металл оқими портлаши орқали юзага келадиган порцион жараён деб фараз қилишди ва бу электронлар эмиссиясидаги етарлича катта электронлар токени тушунтириб беради. Россиялик олимлар: И.Г. Кесаев, Г.А. Месяц, М.А. Яландин, В.М. Куляпин, А.Н. Серьезнов, М.Ф. Жуков, А.С. Коротеев, Г.Ю. Даутов, Б.И. Михайлов, О.Б. Брон, А.М. Смыслов, В.С. Мухин ва бошқалар томонидан олинган катод тушуви яқинидаги катод жараёнларини тадқиқ қилиш натижалари фан ва техникада муҳим аҳамият касб этади. Электротехник комплекс ва системалардаги жараёнлар назарияси ва уларни моделлаштиришни ривожлантириш долзарб ва ҳозирги кунда талаб қилинадиган илмий муаммо ҳисобланади.

Муаммони ўрганилганлик даражаси. Вакуум ёй разряди уйғотилиши ва вакуум-ёй плазмасининг асосий тавсифлари бўйича тадқиқотлар разряди ва металл сиртида уйғотиладиган плазманинг мос физик моделларини ривожлантириш, шунингдек юқори аналитик имкониятларга эга бўлган турли электрофизик методлар асосида ишлайдиган мос электровакуум прибор ва қурилмалардан фойдаланишларни ривожланишига олиб келади. Мазкур диссертация ишида фойдаланилган методлар, хусусан вакуум-ёй плазмасида ва турли материаллар сиртида ион-электрон жараёнлар диагностикаси ва тадқиқотлари методлари етарлича яхши ўрганилган.

Айни вақтда кўриниб турибдики, плазма оқимида ва катод сиртида содир бўладиган элементар жараёнларнинг мос методик-назарий асосларини яратмасдан туриб, ушбу методларни амалга ошириб бўлмайди. Бу кўзда тутилган асослар зарур критерия ва фаразларни танлаш, аниқ мақсадга йўналтирилган ҳаракатлар процедуралар тўплами, шунингдек аналитик приборлардан фойдаланиш, шу жумладан электрон Оже спектрометр ва бошқалардан иборат. Бундай комплекс назарий ва экспериментал ёндошувлар ёй разрядидаги плазма таркиби ва зарядланган заррачалар ҳаракати хусусиятларини, шунингдек ионлар манбаи-металл катод сиртидаги элементар жараёнларни тадқиқ қилишда ишончли тажриба натижаларини олиш имкониятларини таъминлаши керак.

Масалан, Новосибирскда, РФАнинг СБ Ядро физикаси институтида Г.А. Месяц, С.П. Бугаев ва Д.И. Проскуровскийлар катод ячейкасида эктон цикли параметрларини баҳолаш бўйича тадқиқотлар ўтказган. Худди шундай тадқиқотлар Россия, Буюк Британия, Германия, АҚШ, Франция и Япония каби қатор мамлакатларнинг илмий муассасаларида ўтказилган.

Катод ячейкасидаги жараёнларни идентификация қилиш натижаси шуни кўрсатдики, вакуум юқори оқим ёйи –бу стационар жараён эмас, балки порцияли жараёндир, у суюқ металлда пайдо бўлади ва кейинчалик плазмага ўтади. Ҳозиргача мавжуд назарияларда катод доғлари фақат стационар объект сифатида ўрганилган бўлиб, аслида унинг ностационар табиати кўриб чиқилмаган.

Айни дамда, катод жараёнлари параметрларини ҳисоблашнинг математик методларининг мавжуд эмаслиги материалларга электр разрядларининг ўзаро таъсири жараёнларининг етарли даражада ўрганилмаганлиги ва ҳажмий иссиқлик ажралиши ва электр разряди манбаларининг таъсири шароитида содир бўладиган жараёнларни тавсифловчи нозичли дифференциал тенгламаларни ечишнинг аналитик методлари мавжуд эмаслиги билан аниқланади.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқотлари Ион-плазма ва лазер технологияли институтининг қуйидаги тадқиқот режаси доирасида олиб борилган; № АЗ-ФА-Ф173-сонли «Буюмлар сиртига ишлов берувчи ва химоявий катламлар ўстирувчи вакуум-ёйли плазма манбасининг разряд тизимини яратиш», (2012-2014) ва ФА-АЗ-062-сонли «Ион бомбордировка шароитида қопламаларни ион-плазмали қоплаш ва реактив газларда таҳлил қилиш технологиясини ишлаб чиқиш» (2014-2018) мавзусидаги илмий лойиҳалари доирасида бажарилди.

Тадқиқотнинг мақсади авто- ва термоэлектрон эмиссияси шароитларида вакуум-ёй разряди катод доғларидаги жараёнларни ўрганиш орқали вакуум ёй разряди катод доғлари билан қайта ишланган сирт олди катламлари структураси ва бошқа хусусиятларига таъсирини аниқлаш ёрдамида вакуум ёй разряди катод доғларининг ион-плазма таъсири самарадорлигини оширишдан иборат.

Тадқиқот вазифалари:

Қўйилган мақсадга вакуум ёй разрядидаги катод доғларида содир бўладиган жараёнларни назарий ва экспериментал тадқиқ қилишда қуйидаги асосий тадқиқот вазифалари:

вакуум ёй разрядидаги катод доғларида заррачалар системасининг заряд структураси ва содир бўладиган жараёнларни назарий-ҳисоблаш методлари ёрдамида ушбу системанинг ион, электрон ташкил этувчиларини ҳисобга олган ҳолда катод потенциал тушуви соҳасида катод доғи заррачалар системасининг моделини яратиш;

ионларнинг қайта зарядланиши жараёнининг ҳажмий заряд соҳасидаги, бу заряд туфайли шаклландиган электр майдонларида юқори энергияли ионлар генерацияларига таъсирини ўрганиш;

катод сиртида плазманинг таъсири тавсифларига катод сиртидаги фаол моддаларнинг мавжудлигининг, шунингдек катод сиртининг ғадир-будурлиги ва энергия сарфлари таъсирини аниқлаш;

катод доғларининг иссиқлик, ион-плазмавий таъсирлари туфайли катод сирт қатламида юзага келадиган ностационар температура майдонлари параметрларини назарий ҳисоблашлар орқали ўрганиш, вакуум ёй разряди катод доғлари билан қайта ишланган сиртолди қатлами хусусиятлари, структурасига таъсирини аниқлаш;

кувурсимон шаклидаги металл маҳсулотлар ички сиртларида, вакуум ёй разряди катод доғларининг ион-плазма таъсирлари самарадорлигини таъминлаш, шу жумладан вакуум ёй разрядининг икки турининг (турлича шаклланган) кетма-кет таъсири шароитларини аниқлаш каби масалаларни ечиш орқали эришилди.

Тадқиқот объекти сифатида вакуум ёй разряди, унинг катод сиртига таъсир қилувчи катод доғи ҳисобланади.

Тадқиқот предмети вакуум ёй разрядидаги плазма ва катод доғларидаги жараёнлар, шунингдек катод доғларининг сиртга ион-плазмавий ўзаро таъсири, шу жумладан ишқорлар билан фаоллаштирилган коаксиал шаклидаги металл катод ички сирти ҳисобланади.

Тадқиқот усуллари. Диссертация ишини амалга ошириш мобайнида қуйидаги тадқиқот методларидан фойдаланилди: - ностационар жараёнлар ва катод доғларининг сиртга таъсирлари учун математик моделлаштириш методларидан фойдаланиб назарий ҳисоблаш тадқиқотлари; -экспериментал аналитик тадқиқотлар, шу жумладан Оже электрон спектроскопия, рентгеноструктуравий таҳлил, ва MitutoyoSurftest 401 дан фойдаланган ҳолда сирт нотекислигини тадқиқ қилиш учун профилометрдан фойдаланиб амалга оширилди.

Тадқиқотларнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

«совук» катодда вакуум ёй разряди катод доғида катод потенциал тушуви соҳасидаги ионлашишнинг ночизикли ностационар жараёнларининг математик модели ишлаб чиқилди. Электронлар системасининг катод доғи (КД) потенциали орқали тезлаштирилганда чиқиб кетаётган электронлар ҳисобига энергия олиши ва бу энергияни асосан ионларни тезлаштиришга ва электрон газини қиздиришга сарфлаши аниқланди;

биринчи маротаба вакуум ёй разряд катодидан 200 нм масофада 5×10^7 В/см гача электрмайдон кучланганлигини ҳосил қилувчи ионлар қатлами юзага келиши аниқланди. Бунда электр токининг $\sim 10^6$ А/см² гача зичликларида нураланиш ва сочилиш туфайли энергия исрофи унчалик катта эмас, $7,5 \times 10^{19}$ см⁻³ гача концентрацияларда атомларнинг ионлашиши бирга яқин бўлиб, катта концентрацияларда эса ионларнинг қайта зарядланиши туфайли ионлашиш эҳтимоллиги камаяди;

хар хил геометриядаги маҳсулотлар юзасида иссиқлик энергиясининг ҳаракатланувчи нуқта манбаси сифатида вакуум ёйи разрядларининг катод доғи таъсирида металл катоднинг сирт яқин қатламларида ҳарорат тақсмоти математик модели ишлаб чиқилди. Катод-намунанинг сиртга яқин қатламида, катод доғи таъсири минтақасида (КД ўлчами 2-5 мкм, ҳарорат 4000-5000⁰С) максимал ҳароратга эга зона аниқланди шунингдек, уч зонали ҳарорат тақсимлашнишида структурасининг шаклланиши аниқланди;

вакуум ёйи катод доғининг иссиқлик таъсири натижасида қалинлиги 2 мкм дан 20 мкм гача бўлган "оқ қатлам" ҳосил бўлиши, фазали ўтишлар (аустенитнинг пайдо бўлиши), сиртга яқин соҳаларда структуравий (иккинчи турдаги микростреслар) силлиқлаш билан зоналарга мозаик блоклардан 0,1-0,2 мкм гача «табақаланиши» ҳосил бўлишига олиб келиши аниқланди;

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

илк бор катод юзасини вакуум-ёйи билан ишлов бериш жараёнида калий ва натрий гидроксидларининг (контцентрацияси 25% гача бўлган) ишлов берилган пўлат юзасига қопланишида сирт нотекислиги 1,5-3,2 марта пасайишига ва шунингдек, сирт қатламларидан (шу жумладан оксидлардан) тозалаш учун энергия сарфини 1,5-2,4 баравар камайтиришига олиб келиши аниқланди;

илк бор коакциял электрод тизимида катод сиртида вакуум ёйи разрядларининг катод доғларини магнит сканерлаш ва кенгайтирилган цилиндрсимон катодли вакуум-ёйи курилмасини лойиҳалашда ички юзани қоплашнинг оригинал усулларини жорий қилинди, ушбу қопламалар зарур таркибга эга эканлиги ва уларнинг кимёвий таркиби катодли материалга мос келиши ва қопламаларнинг юқори хром таркиби оксидланишдан ҳимоя қилиш хусусиятлари учун муҳим аҳамиятга эга эканлиги кўрсатилган;

вакуум ёйи усулида пўлат сиртини (пўлат 65Г) тозалашда коакциал пўлат намунасининг сиртга яқин қатламларида (С, Мn, Cr, Si) элементларининг тақсимланишига, бу эса вакуум ёйи разряди катод доғининг стационар таъсири натижасида ҳосил бўлиши аниқланди.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги Оже спектрометрияси, рентген фазовий таҳлил, МИМ-8М микроскопи, Mitutoyo Surfest SJ 401 профилометри, ПМТ-3 микрокаттикликни ўлчовчи курилмалар тажриба натиждларни таҳлил қилиш билан биргаликда, сирт тозалигини ва қатлам хусусияларини юқори аниқликда ўрганиш имконини беради. Ушбу таҳлил натижалари назарий таҳлил билан диярли мос келиши билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Илмий аҳамияти: вакуум ёйи разрядининг катод доғидаги ионланиш механизмлари, плазмада юқори энергияли ионларнинг ҳосил бўлиши, катод доғининг катод сиртида фазавий ўзгаришларга олиб келадиган иссиқлик таъсирининг табиати (аустенитнинг пайдо бўлиши), структуравий (иккинчи типдаги микростреслар ва мозаик блокларни силлиқлаш) сирт қатламидаги ўзгаришлар ва коррозияга қарши ва қаттиқлашувчи хусусиятларни таъминлайдиган махсус "оқ қатлам" ҳосил бўлишига олиб келади, ушбу параметрларни ўрганиш зарядланган зарраларнинг сирт билан ион-плазмавий ўзаро таъсири назарияни ривожлантириш учун муҳимдир.

Амалий аҳамияти: қувурли маҳсулотларнинг ички сиртини вакуум-ёйи усулида қайта ишлаш, сиртга бошқариладиган физик хусусиятларга эга функционал қопламаларни қўллаш, юқори талаб қилинадиган техник курилмалар учун зарур ресурсни таъминлаш учун техник тизимлар яратилган.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Қувурли маҳсулотларнинг ички юзасига катод доғлари ёрдамида вакуум ёйи таъсир қилиш жараёнини оптималлаштириш

бўйича олиб борилган тадқиқот натижалари асосида IAP 05070 рақамли металл трубанинг ички юзасини қайта ишлаш усулига 8 (172), 2015 йил сонли Бюллетенида Ўзбекистон Республикаси патенти олинди, шу жумладан патентда катод доғлари таъсирининг мураккаб таҳлилий ва экспериментал тадқиқотлари натижалари ишлатилган турли геометриядаги пўлат қувурлар юзасида вакуум ёйи ёрдамида ишлов бериш имкониятига эга. Ушбу вазифа вертикал равишда жойлашган қувурли маҳсулотнинг ички юзасига таъсир қилувчи вакуум ёйи разряди катод доғлари жараёнини амалга ошириш учун электрод тизимининг ёпиқ коакциял майдонини шакллантиришнинг ишлаб чиқилган усули туфайли бу муаммо муваффақиятли ҳал қилинди.

Олинган Ўзбекистон Республикасининг патенти, IAP 05778, 3(215), 2019 й. пўлат қувурли маҳсулотлар юзасига вакуум ёйи катод доғларининг комплекс таъсирини таҳлилий ва экспериментал тадқиқотларда қўлланиладиган қувурларнинг ички юзасини вакуум-ёй билан ишлов бериш усули бўйича.

Ушбу вазифани ташкил этувчи техник тизим туфайли, керакли функционал хусусиятларни бериш, қайта ишлаш жараёнининг самарадорлиги ва сифатини ошириш учун металл буюмлар сиртига вакуум ёйи разряднинг технологик таъсирининг функционаллигини кенгайтириш, металл трубанинг ички юзасини бир вақтнинг ўзида ишлайдиган иккита вакуум ёйи разрядлари билан комплекс қайта ишлаш муваффақиятли ҳал қилинди.

Диссертацияда олинган илмий натижалар қўллаш қувурли маҳсулотларнинг ички юзасига самарали тозалаш ва ҳимоя қопламаларини қоплаш («Ўзелтехсаноат» АЖнинг 2022 йил 24 мартдаги 04–3/474-сон маълумотномаси) имконини беради.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишинатижалари 11 та тезис ҳалқаро конференциялари маърузаларида муҳокама қилинган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси доирасида жами 21 та илмий мақола чоп этилган, шулардан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг фалсафа доктори (PhD) диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этишга этилган илмий журналларда 8 та мақола, жумладан 5 та республика ва 3 та чет эл илмий журналларида нашр этилган, 2 та патент олинган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация ишининг тузилиши кириш, тўрт боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертация ҳажми 115 бет матндан, шу жумладан 39 расм ва 9 жадвалдан иборат.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Диссертациянинг кириш қисмида, диссертация мавзусининг ахамияти ва долзарблиги асосланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари шакллантирилган, тадқиқот объектлари, предмети ва усуллари ҳақида маълумот берилган, тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва техникани ривожлантиришнинг устувор йўналишларига мувофиқлиги аниқланган. Олинган натижаларнинг илмий янгилиги ва илмий- амалий ахамияти тақдим этилган, натижаларнинг ишончилигига асосланиб, уларни амалга ошириш, ишнинг апробация натижалари ва диссертация тузилмаси ҳақида маълумотлар келтирилган.

Диссертация ишининг биринчи бобида **“Вакуум - ёйли разряд ва металл плазма оқимларини ҳосил қилиш тамойиллари”** замонавий адабиётлар маълумотларига умумий нуқтаи назарни беради. Тажриба ва назарий ишларни таҳлил қилиш натижалари шуни кўрсатадики, ҳозирги вақтда қуйидагилар ўрганишга катта эътибор қаратилмоқда: - вакуум-ёйли разряд параметрларининг ионланиш жараёнига таъсири; - катод доғларининг тузилиши; - катод доғларининг ҳарорат таъсири остида металл катод юзасида структуравий ўзгаришлар. Бу ўта тоза металлларни олиш, имплантация технологияларидан фойдаланиш учун «металл» плазмасининг интенсив оқимларини яратиш ва турли қопламалар олиш, зарядланган заррачаларнинг юқори оқим дасталарини ҳосил қилиш ва коммутация технологиясини олиш истикболлари билан боғлиқ.

Бироқ, барча ҳолатларда, катод юзасида катод доғи плазмаси шакилланишида ионизация жараёнларини аналитик тахлили шунингдек, ҳар хил геометрияга эга бўлган катодларда (иссиқлик энергиясининг нуқтавий манбаси) катод доғининг таъсир чегараси, катод олди соҳаларидаги температура тақсимоти ҳисоблаш муҳим аҳамиятга эга.

Катод юзасида ионлашиш жараёни ва температура тақсимотининг аналитик тахлили етарлича тадқиқ қилинмаган. Ушбу ўрганиламаган муаммолар диссертация ишининг мақсадини белгилаш ва вазифаларини амалга оширишда асос бўлиб хизмат қилди.

Иккинчи боб “**Назарий тадқиқот усуллари. Экспериментал қурилмалар**” вакуум-ёй разрядини амалга оширишда электрод тизимларининг тавсифи ва тадқиқот усуллари бағишланган.

Тадқиқотлар Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси У.А. Арипов номидаги Ион-плазма ва лазер технологиялари институтининг Ион-плазма технологиялари лабораториясида лойиҳалаштирилган ва ишлаб чиқилган вакуум қурилмаларида ўтказилди. Диссертация ишини бажаришда қўйилган вазифаларни вакуум шароитида катод намунасининг вакуум ёйининг катод доғлари таъсири натижасида (сиртни тозалаш, иссиқлик ва ион-плазмавий таъсири) сирт ва сиртга яқин қатламлардаги катод доғлари ва уларнинг физик хоссаларини ўрганиш технологик қайта ишлашни амалга ошириш керак эди.

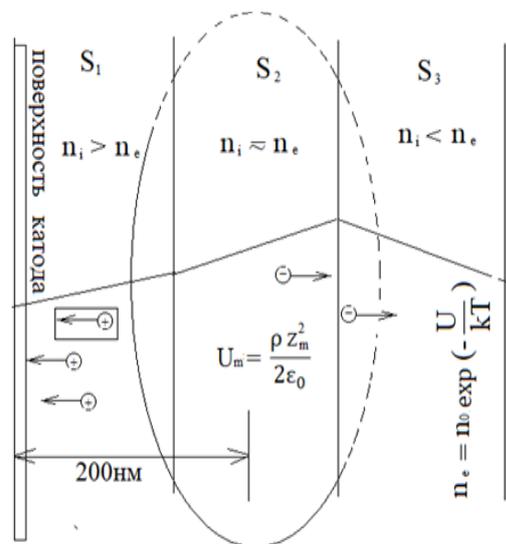
Тажрибалар универсал вакуум постида (ВУП), ва вертикал вакуумли технологик қурилмаларда ўтказилди.

Олинган натижалар Mitutoyo Surftest SJ 401, Твердометр ПМТ-3, рентген қурилмаси ДРОН-2, микроскоп МИМ-8М ва Оже спектрометри ёрдамида таҳлил қилинди.

Ушбу усуллар биргаликда қуйидагиларни аниқлашга имкон берди: металл намунасининг ишлов берилган юзасининг нотекислигини ўрганиш; унинг сирт қаттиқлиги; термик таъсирдан кейин металл юзасида структуравий ўзгаришларни таҳлил қилиш, намуна юзасида элементларни баҳолаш.

Учинчи боб “**Вакуум ёйи разрядининг катодда зарядланган заррачаларнинг ҳосил бўлиш жараёнлари**” да фазовий зарядларнинг ўзига хос хусусиятлари, бир томондан, юқори электр ўтказувчанликка эга катодга, бошқа томондан, яхши ўтказувчан квази-нейтрал плазма оқимида шунингдек, катод доғининг намуна бўйлаб ҳаракатланишидан таъсирланган ҳудуднинг сиртга яқин қатламида ҳарорат тақсимоти тенгламалари ҳам эчилади.

Биринчи ҳолда, потенциал $U=U_{\max}$ максимал, майдон кучланганлиги $E_0=0$ ва бу текисликнинг ҳар икки томонидаги умумий зарядлар бир-бирига тенг бўлган текислик модели қўлланилади.



1-расм. Катод юзасида ўтиш ионизация жараёни модели

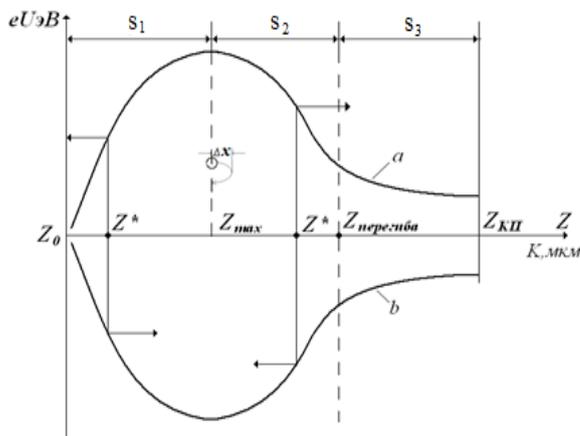
Бунда катод юзасида манфий заряд кўзғатилади ва фазовий заряднинг мусбат зарядланган қисмида плазмадан электрон концентрацияси ион контсентрациясидан ошиб кетадиган ҳудуд билан ажратилади. 1-расмда катод юзаси яқинидаги вакуум ёйининг катод доғидаги фазовий заряд минтақасининг диаграммаси кўрсатилган бўлиб, ионланиш жараёни ва фазовий заряднинг ҳосил бўлиши тасвирланган.

Вакуум ёйининг катод доғи ҳудудида ҳажмий заряднинг ҳосил бўлиши катод юзасидан бир неча нанометр масофада содир бўлади ва унда генерацияланган зарядланган заррачаларнинг хаотик ҳаракати билан боғлиқ.

200 нм масофада ҳосил бўлган катод юзасига нисбатан ион тўпланишининг максимал қиймати ҳудуди фазовий заряд (катод потенциалининг пасайиши) минтақасини учта зонага ажратади. Ҳажмий зарядлар майдони катодга яқин

масофада жойлашган юқори зичликдаги ионлардан иборат бўлиб, доимий равишда катод юзасини бомбардимон қилади. Бундан ташқари, бу плазмали қатлам 10^7 В/см эга бўлган электр майдонини ҳосил қилади, бу эса ионланиш жараёнининг самарадорлигини кескин ошишига олиб келади. Катод юзасидан $Z > 200$ нм масофада S_3 зонасидаги ҳажмий зарядларнинг таъсири потенциал фарқнинг камайиши (катод ва КД ҳажмий заряди орасидаги) ва S_3 зонаси электрон зичлиги ошиши ҳисобига камаяди.

2-расмда катод ҳажмий заряд орасидаги масофаларга боғлиқ бўлган электронлар ва бир хил зарядланган ионларнинг потенциал энергиясининг ўзгариши, шунингдек, катодга яқин жараёнларнинг энергиясини тушунтирувчи характерли координаталар кўрсатилган.



2-расм. Катоддан турли масофаларда вакуум ёйининг катод доғи потенциал энергиянинг ўзгариши: а-электрон, в-ион.

Бунда атомларнинг ионланишида ҳосил бўлган ионлар ва электронларнинг потенциал энергияси тенг, лекин ишораси бўйича қарама-қаршидир. Аслини олганда, нейтрал атомнинг ионланиши бутун тизимнинг потенциал энергиясини ўзгаришига олиб келмайди ва ионлар тирбантликни тарк этиб, ҳеч бўлмаганда $U_{кп}$ нуқтасига қадар потенциал тўсиқлар билан кечиктирилмайди, электронлар эса потенциал чуқурликда тушиб қолади. Бинобарин, ионланиш ҳудудида ион зарядининг тўпланишида ундан «янги» электронлар ҳосил бўлиши мумкин. Шундай қилиб, биринчи S_1 зонада ионлар катод томон тезлашади, иккинчи S_2 ва

учинчи S_3 зонада ионлар анод томон ҳаракатланади ва потенциал тўсиқларга дуч келмасдан, кўриб чиқиладиган майдонни тарк этади.

Биринчи S_1 зонасидаги ҳолатларни батафсилроқ таҳлил қилиш учун (1) тенгламани ечиш керак. Ионнинг массаси $9,3 \times 10^{-26}$ кг ва атомнинг радиуси темир атомининг радиуси $1,27 \text{ \AA}$ га тенг бўлса, биз S_1 зонасидаги электрон концентрацияси ион концентрациясининг 3% дан ошмаслигини аниқлаймиз. Бунда, S_2 зонасида мавжуд бўлган электронларни эътиборсиз қолдириб, ионларнинг доимий концентрациясини ҳисобга олсак, Пуассон тенгламасининг (1) ечимларини қуйидаги шаклда олиш мумкин:

$$U = U_M \left[1 - \left(\frac{Z}{Z_M} - 1 \right)^2 \right], \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial Z} = 2U_M \left(\frac{Z}{Z_M} - 1 \right) \frac{1}{Z_M}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} = -\frac{2U_M}{Z_M^2} - \frac{2U_M}{Z_M^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad (3)$$

Катод юзасидан $Z > 200$ нм масофада S_3 зонасидаги ҳажмий зарядларнинг таъсири КД ҳажмий заряди ўртасидаги потенциаллар фарқининг камайиши ва S_3 зонасида электрон концентрациясининг ортиши ҳисобига амалга ошади.

200 нм масофада кучланишнинг ўртача қиймати максимал натижага эришади. Формула (4) асосида биз максимал кучланиш қийматини ҳисоблаймиз.

$$U_m = \frac{\rho Z_m^2}{2\epsilon_0} \quad (4)$$

Кучланиш максимал қийматга етганда, ионланиш жараёни $1/Z_m$ боғлиқлигига қараб камаяди. Бироқ, E_m тахминий ҳисобланади. Катоддан қандайдир масофада камида битта электрон катоддан иссиқлик таъсирида тезлик билан ҳаракатланадиган ҳар бир атом орқали ўтишини ҳисоблаш.

1-жадвалда катод материалининг буғланиш тезлиги, катод ҳарорати ва Z_i масофадаги атом контсентрациясининг ҳисобланган қийматлари кўрсатилган.

Катоддан Z_i масофада турли E электр майдонларида мис катод учун оқимлар, буғланиш тезлиги, катод доғи ҳарорати ва оқимдаги атомлар концентрациясини ҳисоблаш натижалари 1-жадвалда келтирилган мос келадиган оқимлар учун қайта зарядлаш натижаси Z_i қалинлиги бўлган ғовакли диелектрик юзасида ионларнинг чўкишига ўхшашлигини кўрсатади, бунда $10^7 \text{ В} \times \text{см}^{-1}$ ва ундан юқори майдонлар пайдо бўлади.

1-жадвал

Катод материалнинг буғланиш тезлиги, катод ҳарорати ва $\sim Z_i$ масофадаги атомлар контсентрациясининг ҳисобланган қийматлари

$E, \text{ В/см}$	$v_a, \text{ г/см} \times \text{с}^{-1}$	$G, \text{ г/см}^2 \times \text{сек.}$	$T, \text{ К}$	$n_a, \text{ см}^{-3}$
10^4	7.5×10^{22}	8	2850	7.75×10^{17}
10^5	7.5×10^{23}	80	3400	7.1×10^{18}
10^6	7.5×10^{24}	800	4350	6.25×10^{10}

Катод доғининг ҳарорати ошиши билан ион заряд алмашуви минтақаси катодга яқинлашади, бу эса $\sim 200 \text{ нм}$ масофага вужудга келади. Катод потенциал тушимининг $10 - 20 \text{ В}$ қийматларида электр майдон кучланганлиги $\sim (2-5) \times 10^7 \text{ В} \times \text{см}^{-1}$ га эришилади. Бундай майдонларда термоавто эмиссиясининг катта ток зичлиги ($10^7 - 10^8 \text{ А} \times \text{см}^{-2}$) катодни Жоул ва Ноттингем иссиқлиги билан қиздиради, бу эса эмиттернинг сирти мос келадиган портлашига олиб келади. Ушбу портлаш натижасида катод доғи вайрон бўлади, кўринишидан элементар катод доғларининг мавжудлигининг жуда қисқа (бир неча мкс) давомийлигини ва паст ток ҳудудида ёй зарядини тушунтиради. Ёй тоқининг ошиши (доғлар сонининг кўпайиши) билан алоҳида портлашлар - парчаланишлар умумий ёй циклида катта роль ўйнамайди, бу эса разряд эҳтимолининг ошишига олиб келади.

Вакуумли разряди, катод доғининг ҳаракатини кўриб чиқишда цилиндрсимон электродда ҳосил бўлган ҳарорат майдони катта аҳамиятга эга. Намуна юзасига яқин қатламларда ҳосил бўлган ҳаракатланувчи ҳарорат майдони, намуна юзаси доимий қувватнинг ҳаракатланувчи нуқтавий манбасига узоқ вақт таъсир қилиш билан, чекловчи квазстационар ҳолатга мойил бўлади ва вақт ўзгармаслиги билан тавсифланади. Ушбу чекловчи ҳолат катод доғлари бўлган ҳаракатланувчи манбанинг узоқ таъсиридан кейин ўрнатилади.

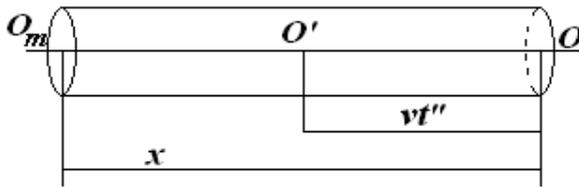
Намуна юзасига яқин қатлам тез таъсир этувчи нуқтавий манбаси билан қиздирилганда, жараён бошланганидан кўп ўтмай манбага яқин минтақадаги чегара ҳолати вужудга келади. Кўриб чиқиладиган масалада иссиқлик изоляцион чегаралари радиуси r бўлган ярим чегараланган қувурнинг сиртга яқин қатламида, агар Q қувватнинг нуқтавий манбаи намуна бўйлаб v_0 тезликда ҳаракатланса, бошланғич ҳарорат тақсимооти нолга тенг бўлган ҳарорат тақсимоотини топиш талаб этилади. ОХ ўқи чексиз қувур чегараси бўйлаб йўналтирилган ва унга перпендикуляр ОУ ўқи бўлган координаталар тизимини танлаймиз. У ҳолда ХОУ координаталар системасида: $0 \leq x < \infty, 0 \leq y \leq r$ ва иссиқлик манбаси $y = y_0$ тўғри чизиқ бўйлаб ҳаракатланади.

(7) ифодани оламиз:

$$T(x, y, \tau, r) = \frac{q}{c\rho a\sqrt{\pi l}} \int_0^\tau \left(\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\left(\frac{an\pi\Delta r}{l}\right)^2(\tau-\theta)} \cos \frac{n\pi}{l} y_0 \cos \frac{n\pi}{l} y \right) * \left(e^{-\frac{(x-v_0\theta)^2}{4a^2(\tau-\theta)}} + e^{-\frac{(x+v_0\theta)^2}{4a^2(\tau-\theta)}} \right) \times \frac{1}{\sqrt{\tau-\theta}} d\theta \quad (7)$$

Бундан ташқари, маълум бир яқинлашиш билан чегараланган ҳарорат тенгламаларидан ўрганиладиган жараённи тавсифловчи изотерм тенгламаси олинади.

3-расмда. τ вақтида $O'O_m$ нинг M кузатиш нуқтасигача бўлган масофанинг OX ўқиға проекциясини кўрсатилган. 3-расмдан куйидагича $x-v_0(\tau-t)$ қиймати - τ вақтидаги M



3- расм. v тезликда ҳаракатланувчи иссиқлик манбасининг τ вақтида O_m кузатиш нуқтасигача бўлган масофанинг OX ўқиға проекцияси.

кузатиш нуқтасигача бўлган масофанинг OX ўқиға проекцияси, яъни $O'O_m=x-v_0(\tau-t)$. Агар $O'O_m = x + v_0 t''$ қўйсақ, бу эрда x - манбадан кузатиш нуқтасигача бўлган масофа ва t'' - кўриб чиқиладиган манба иссиқлигининг тарқалиш вақти, у ҳолда $T(x, y, \tau)$ учун (8) ифодани оламиз.

$$T(x, y, \tau) = \frac{Q}{c\rho a\sqrt{\pi}l} \int_0^\tau \left(\frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\left(\frac{an\pi\Delta r}{l}\right)^2 t''} \cos \frac{n\pi}{l} y_0 \cos \frac{n\pi}{l} y \right) e^{-\frac{(x+v_0\theta)^2}{4a^2 t''}} \frac{1}{\sqrt{t''}} dt'', \quad (8)$$

Нуқтавий манбанинг намуна бўйлаб ҳаракатланиш $v_0 \geq 10$ см/сек тезлиги катта бўлганлиги сабабли, у ҳолда чекловчи ҳарорат тенгламаси куйидаги шаклни олади:

$$T(\tau, y, \infty) = T_0 \left(\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\left(\frac{an\pi}{l}\right)^2 \tau} \cos \frac{n\pi}{l} y_0 \cos \frac{n\pi}{l} y \right), \text{ при } x < 0, \quad (9)$$

$$\text{и } T(x, y, \infty) = T_0 e^{-\frac{v_0^2 \tau}{a^2}} \left(\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\left(\frac{an\pi}{l}\right)^2 \tau} \cos \frac{n\pi}{l} y_0 \cos \frac{n\pi}{l} y \right) \text{ при } x > 0, \quad (10)$$

(9) ва (10) формулалардан келиб чиқадики, $x < 0$ ва $x > 0$ учун чегара ҳарорат тенгламалари бир-биридан $\exp\left(-\frac{v_0^2 \tau}{a^2}\right)$ ифода билан фарқланади, яъни манба ҳали пайдо бўлмаган минтақадаги нуқталар чегара ҳарорати, манба аллақачон мавжуд бўлган тегишли нуқталардаги ҳароратлардан $\exp\left(-\frac{v_0^2 \tau}{a^2}\right)$ марта камроқ.

$x \rightarrow \infty$ бўлганда, яъни манбадан узоқда жойлашган нуқталар учун ҳарорат стационар ҳолатга интилади, бу куйидагича тавсифланади:

$$\frac{T_0}{2} = \frac{Q}{c\rho l v_0} \quad (11)$$

$T=1000-1500$ °С юқори ҳароратга тўғри келадиган катод доғи таъсирида ҳосил бўлган 45 пўлат намуна учун ёпик эгри чизик шаклида изотермалар, пастроқ ҳароратлар $T=300-600$ °С изотермаси эса OX ўқиға асимптотик тарзда $x \rightarrow 0$ ($\tau \rightarrow 0$) яқинлашади. Намуна радиуси r бўлган цилиндр шаклидаги намуналар (10) ифода билан ҳисобланади.

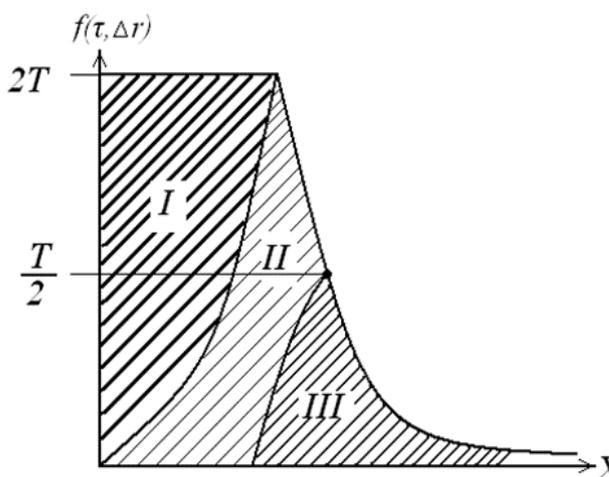
Нуқтавий манба $y_0 = \frac{l}{2}$ тўғри чизик бўйлаб ҳаракатланаётганда, (10) ифодадан, яъни $x < 0$ бўлганда. Қуйидаги ифодани оламиз

$$0,5 < \theta < 1,5, \quad 0 < \tau < -\left(\frac{l}{2a\pi}\right)^2 \ln\left(\theta - \frac{1}{2}\right) + \Delta r_1.$$

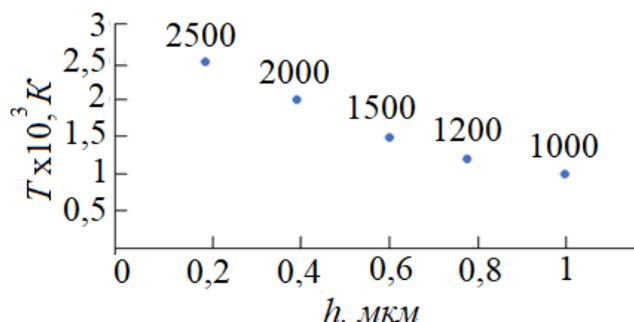
Паст иссиқлик ўтказувчан пўлатдан ясалган цилиндрсимон намунада, масалан, пўлат 45, $x < 0$ да бир хил ҳароратли изотермалар билан чегараланган зоналар энг катта радиусга эга, изотермлар иссиқлик манбасидан ҳаракат йўналишига қарама-қарши йўналишда кўпроқ чўзилган. Юқорироқ иссиқлик ўтказувчан пўлатларга (65Г, 08КП) мос келадиган тенг ҳароратли изотермалар $x > 0$ да камроқ бўлади ва конфигурация бўйича айланага яқин бўлади. Иссиқлик ўтказувчанлиги юқори бўлган металллар иссиқлик ўтказувчанлиги камроқ металлларга қараганда $x < 0$ бўлганда, бир хил ҳароратли изотермлар билан чегараланган зоналар каттароқ радиусга эга бўлади. Бунинг сабаби шундаки, иссиқлик ўтказувчанлиги кўпроқ бўлган металллар манбаларига туташган зоналар иссиқлик ўтказувчанлиги камроқ металлларнинг мос келадиган зоналарига қараганда тезроқ қизийди. Иссиқлик манбаси $x < 0$ бўлган ҳолатда зоналарда совутиш жараёни содир бўлади ва кўпроқ

иссиқлик ўтказувчи металллар учун иссиқлик йўқотилиши анча интенсив равишда содир бўлади.

Шунинг учун иссиқлик ўтказувчанлиги кўпроқ бўлган бу зоналарда ҳарорат камроқ иссиқлик ўтказувчан металлларнинг мос келадиган зоналарига қараганда паст бўлади.



4-расм. $x < 0$ га мос келадиган майдонда $\theta_2(\tau)$ ва $\theta_1(\tau)$ - $x > 0$ графиги.



5-расм. 1мкм чуқурликгача намуна сиртининг қатлами бўйича температура тақсимоти

пасайиши соҳасидаги чизикли бўлмаган стационар ионланиш жараёнларининг математик модели ишлаб чиқилди. Заряд тизими катод потенциали томонидан чиқарилган электронларнинг тезлашиши ҳисобига энергия олиши ва уни асосан ионларнинг тезланишига ва электрон газни иситишга сарфлаши аниқланади;

- турли геометрияли маҳсулотлар юзасида иссиқлик энергиясининг ҳаракатланувчи нуқтавий манба сифатида вакуум ёй разрядли катод доғи таъсирида металл катоднинг сиртга яқин қатламларида иссиқлик энергиясини тақсимланиши материалнинг структуравий ўзгаришларини математик модели ишлаб чиқилди;

- вакуум-ёйли разряд пайтида катод-намунадаги ҳарорат майдонининг тақсимланиш тенгламаларини ечиш орқали катод намунасининг сиртга яқин қатламида уч зонали ҳарорат тақсимот структурасини шаклланиши аниқланди.

Тўртинчи боб (Катод плазмасининг катод сиртига таъсирининг табиати).

Ушбу бобда сиртни фаоллаштирувчи моддалар (СФМ) билан қопланган катод сиртининг эрозияси жараёнлари ўрганилди, жараён вакуум камерасида жойлаштирилган электрод тизимида амалга оширилди. Синов намуналари X8Cr17 (стандарт DIN17440) ва 08X18H10 (ГОСТ 5632-72), қалинлиги 5 мкм бўлган оксид қатлами пўлатдан (ишлов берилмаган) тайёрланган (2-жадвал). Пўлат 08X18H10 аустенитли коррозияга чидамли, X8Cr17 пўлати эса никелнинг йўқлиги, паст углерод миқдори, юқори иссиқликка чидамлиги,

Натижада $\theta_1(\tau)$, $\theta_2(\tau)$, $\tau = 0$ ($x = 0$) эгри чизиклар билан чегараланган учта зона I зона юқори ҳарорат зонаси II зона паст I ва II зоналарни ажратиб турувчи чекловчи ҳарорат зоналари олинади. III зона $x = 0$ нуқтада $\tau = 0$ momentiда пайдо бўладиган тўлқин fronti тўғри келади. 4-расмдан кўриниб турибдики, намуна чегарасида иссиқлик изоляцияси ва муҳит билан иссиқлик алмашинуви йўқлиги сабабли, иссиқлик манбаи (катод доғи) томонидан намунанинг сиртга яқин қатламида чегара ҳарорати $T/2$ I ва II фронт чегарасида мос келади.

5-расмда. материалнинг портлаш пайтида катод юзасига катод доғи (микроратерлар) таъсир зонасида ҳисоблаш асосида олинган ҳарорат тақсимотини кўрсатилган. 0,2 мкм чуқурликда катод доғининг ҳарорати 2500 K гача кўтарилади, бу эса оқ қатлам ҳосил бўлишига сабаб бўлади.

Шундай қилиб, вакуумли плазма разрядларининг заряд таркибининг ушбу хусусиятларини ва зарядларнинг тақсимланиши катод намунаси юзаси бўйлаб катод доғларининг ҳаракати, ҳарорат майдонининг тақсимланишини кўриб чиқиш натижасида, қуйидаги муҳим натижаларга эришилди:

- «совук» катодда вакуум ёйи катод доғининг КД, катод потенциали

олтингугурт мухитда коррозияга чидамлилиги билан ажралиб туради. Ишқорларнинг сувли эритмасидан металл катод юзасига ётқизилган модданинг сирт контсентрацияси ушбу сувли эритманинг концентрациясига мутаносиб бўлиб,

2-жадвал

Тадқиқ қилинаётган пўлат материалининг таркиби

Марка стали	Компоненты, %						
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
08X18H10	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	18.0–20.0	8.0–10.5
12X17	0.12	1.0	0.04	0.03	1.0	16.0–18.0	0.75

ушбу жараён ўрганилаётган катоднинг сирт ғадир будурлигини ва катод доғларини (КД) сиртга таъсир майдонининг КОН ва NaOH ишқорлари контсентрациясига боғлиқлигини ўрганиш имконини берди. КД нинг пўлат катод юзасига таъсири токда 140-340 А вакуум ёй разрядида амалга оширилди, сирт зарядининг зичлигига 6 Кл/см² тўғри келди. Намуна юзасига 10% контсентрацияли КОН гидроксиди эритмасини қўллаш катод сиртига пропорцияси 0,001 г/см² га тўғри келади. 3-жадвалда КОН ва NaOH нинг сувли эритмаларини суртилиб вакуум-ёйни қайта ишлашдан кейин ўзига хос энергия сарфига ва 08X18H10T ва X8Cr17 пўлатларидан тайёрланган катоднинг синов намунасининг сирт ғадир будирлиги бўйича маълумотлар келтирилган.

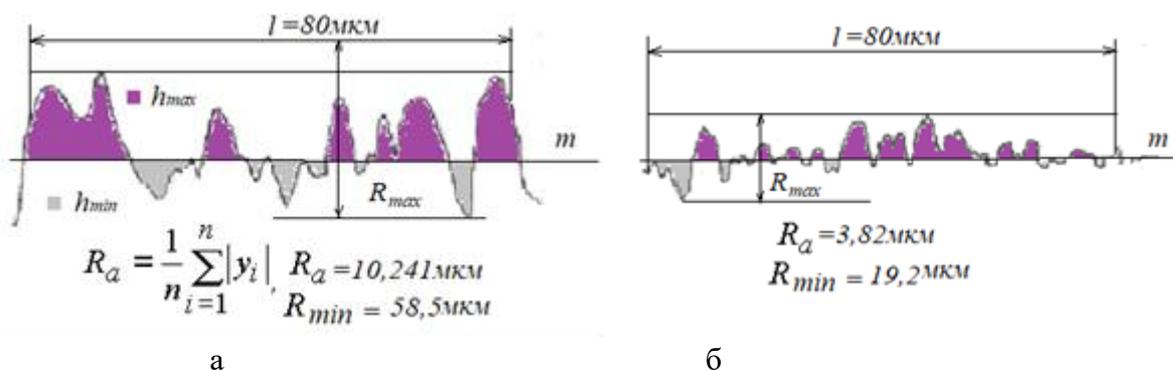
3-жадвал

Ишқорий металл бирикмаларининг вакуум ёйи билан ишлов беришнинг энергия сарфига таъсири ва пўлат катоднинг сирт ғадир будирлиги

Ишқорий модда, %	Пўлат маркаси	Сирт ғадир будирлиги, Ra	Сирт ғадир будирлиги, Rmin	Солиштирма энергия сарфи, кВт×ч/м ³
Без СВ	12X17	10,2	58,5	5,82
КОН 10%	08X18H10	5,4	31	2,71
КОН 20%	08X18H10	4,3	25,4	2,57
КОН 25%	08X18H10	4,0	30,7	2,8
Без СВ	12X17	11,9	51,8	5,98
КОН 20%	12X17	3,8	19,2	2,63
КОН 25%	12X17	4,1	21,4	3,42
NaOH10%	12X17	7,8	34,1	2,85
NaOH 20%	12X17	6,8	31,0	3,0
NaOH 25%	12X17	8,3	36,5	3,65

3-жадвалдан кўришиб турибдики, ишқорларнинг сувли эритмалари 20% контсентрациясида умумий энергия сарфи 1,5-2,4 марта, сирт ғадир будирлиги эса 1,5-3,2 марта камаяди. Ишқор контсентрацияси 10-15% бўлганда, сиртдаги ишқор контсентрациясининг бошланғич қийматидан ~2,5 баравар кам бўлган қийматга эришиши билан сирт ғадир будирлиги тез пасайиб бориши аниқланди. Ишқор контсентрациясининг янада ошиши сирт ғадир будирлиги бир оз ошишига олиб келади. 08X18H10 пўлатдан ясалган катод намунасида, КОН 20% контсентрациясида, сирт ғадир будирлиги 2,4 баравар камаяди ва энергия сарфи 2,2 баравар камаяди. 12X17 маркали пўлатда NaOH- 20% контсентрацияларда ғадир будирлик 1,8 баробар, жараённинг энергия сарфи эса 1,9 баробар камаяди. 20% КОН контсентрациясида 12X17 пўлат учун сезиларли ўзгариш кузатилди ва энергия харажатлари 2,2 марта ва 3 баробар камайганлиги аниқланди.

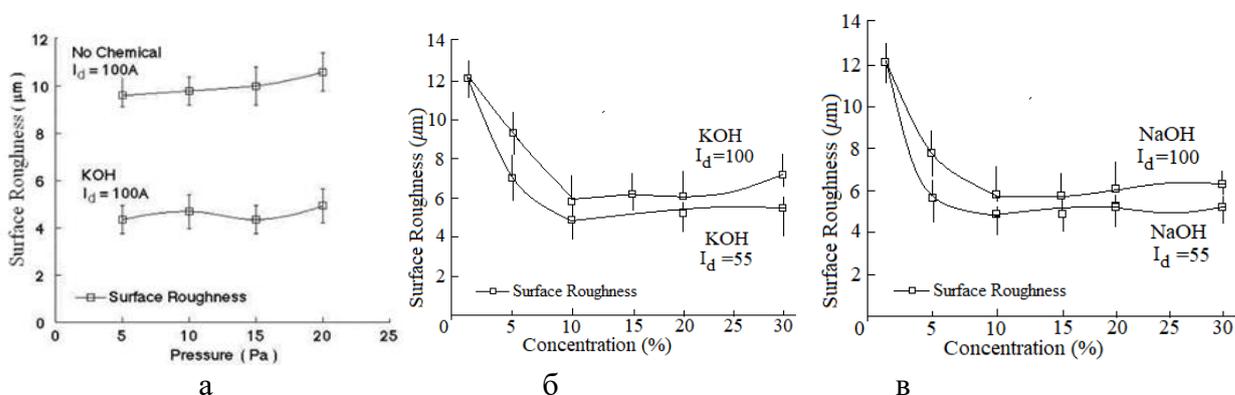
Механик усулда қайта ишланган 08X18H10 пўлат намунаси сиртининг характерли профилограммалари ва вакуум ёйи разряднинг КД билан ишлов берилган наъмуна мос равишда ба, бб-расмларда кўрсатилган.



6-расм. Механик усулда қайта ишланган пўлат намуналарининг сирт профилограммалари - а ва вакуум-ёйли разряда ишлов берилгандан кейинги профилограммаси - б.

б- расмдан кўриниб турибдики, вакуум ёй разряди ёрдамида ишлов берилган намуна морфологияси кескин ўзгаришини кўришимиз мумкин.

7а-расмдан кўриниб турибдики, намунанинг сирт ғадир будирлиги босимга мутлақо боғлиқ эмас, аслида вужудга келган катод доғининг сони ток разрядига чизиқли боғлиқ.

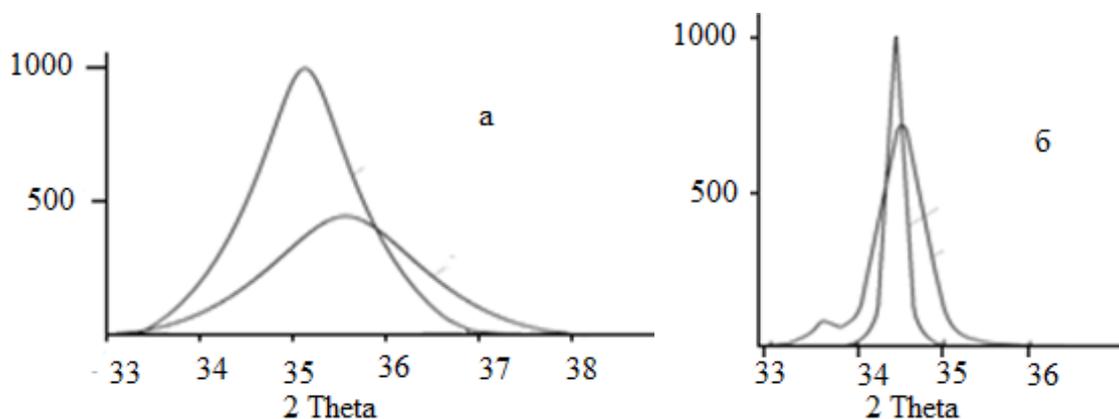


7-расм. Сирт ғадир будирлиги разряд токи ва қўлланиладиган кимёвий моддалар контсентрациясига боғлиқлиги: а) Ишқорсиз, б) КОН ишқори билан, в) NaOH ишқори билан.

Олинган тадқиқод натижалари шуни кўрсатадики, КОН ва NaOH ишқорларини қўллаш катод доғининг намуна юзасига таъсирининг табиатига сезиларли таъсир қилади. КОН нинг сувли эритмалари ёки гидроксил нитрат билан КОН аралашмаси (масалан, $\text{Ba}(\text{NO}_2)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) сиртга суртилганда катод юзасидан электроннинг чиқишини енгиллаштиради, аниқроғи чиқиш ишини камайтиради. Сиртий фаол моддаларнинг этарлича паст иссиқлиги буғланишининг ва паст ионланиш потенциалида КД даги ионланиш жараёнларининг интенсивлигини оширади, катод доғлари таъсиридан кейин катод сиртининг нотекислиги сезиларли даражада ўзгаради ва натижада сирт ғадир будирлиги камаяди.

Стационар вакуумли ёйни разрядини амалга оширишда КД нинг намуналарнинг ишчи юзасига таъсири натижасида, бу намунанинг ишчи қисмининг бутун сирт бўйлаб қайта ишлашни таъминлайди.

8а-расмда 45 пўлатдан ясалган цилиндрсимон пўлат намунаси юзасига вакуум ёйи билан ишлов беришдан олдин ва 8б-расмда шу пўлат сиртига КД вакуум ёй разряди ёрдамида ишлов берилган пўлат дифрактограммаси келтирилган.



8- расм. Хром анод ёрдамида олинган пўлат(45) намунаси сиртининг диффрактограммалари: а - дастлабки, б - тозаланган.

Иккала ҳолатда ҳам остенитнинг улуши аҳамиятсиз. Намуна сиртига ёй разряди ёрдамида ишлов бериш пайтида "оқ қатлам" нинг қалинлиги кичик - 2 мкм дан 20 мкм гача бўлганлиги сабабли, ушбу қатламнинг таркиби ҳақида энг яхши маълумотни юмшоқроқ, камроқ кириб борадиган нурланишдан (хром анодидан) олиш мумкин. Шунинг учун γ - фаза хромли анод билан олинган диффракграммада аниқроқ кўринади. Бу эса аустинет таркибини ҳисоблаш имконини беради ва унинг миқдори $\sim 8\%$ эканлигини кўрсатди.

Ўрама лента курунишидаги пўлат махсулот (ст.65Г) намунани тозалаш натижасида сирт қатламида содир бўлган ўзгаришлар пўлат (ст.45) сирт қатлами ўзгаришларга ўхшайди ва кичик миқдорда γ -фазадаги аустенит номоён бўлади.

Аустенит фазасининг таркиби ишлов бериш режимига, катод доғининг катод сиртидаги ҳаракат тезлигига, шунингдек, ифлосланиш хусусиятига қараб ўзгаради. Жараённинг энергия сарфи аниқлаш натижалари 4-жадвалда келтирилган.

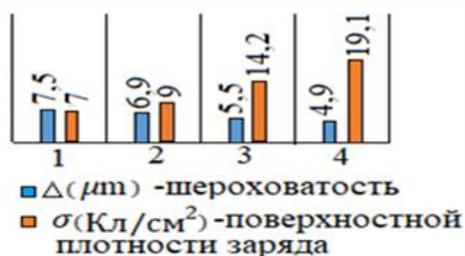
4-жадвал.

Ёй разряди билан пўлат сиртини тозалашда энергия сарфи.

Пўлат прокат намуна номи	Темир оксиди қалинлиги мкм.	Энергия сарфи кВт/час.
Лента г/к сталь 12Х18Н10Т	2	0,67
Лента х/к сталь 30	1	0,5
Катанка, пўлат 65Г	40	7,7
Катанка, пўлат 65Г	2	0,47
Катанка, пўлат 65Г	6	1,9
12Х18Н10Т	10	1,3
Катанка, пўлат Р6М5	5	0,85
Катанка, пўлат Р6М5		

Жадвалдан. 4 дан кўришиб турибдики, бир хил пўлат маркали намуналарни тозалашда энергия сарфи оқалина қалинлиги билан мутаносибдир.

Сиртни тозалашда вакуум-ёй разряди катталиклари, шунингдек, ўзига хос энергия сарфи ишлов берилган юзанинг ғадир будирлиги синфига сезиларли таъсир кўрсатиши аниқланди.



10-расм. Сиртий заряд зичлиги ва сирт ғадири будирлигининг боғлиқлиги.

заряд зичлиги $18 \text{ Кл}/\text{см}^2$ дан ортганда (тадқиқотлар $20 \text{ Кл}/\text{см}^2$ сиртий заряд зичликка қадар ўтказилди), ғадири будирлик 1,5 матага камаяди.

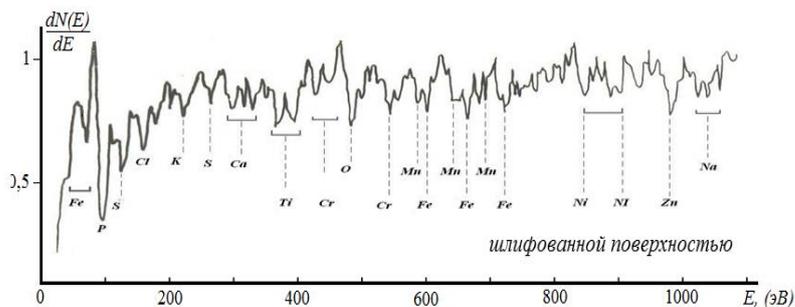
Шундай қилиб, металл сиртини тозалашда сиртий заряд зичлиги ва вакуум ёйи катталликлари орасида боғлиқлик мавжуд.

65Г пўлат намуналарида вакуум-ёй разряди билан ишлов беришнинг сиртга яқин қатламининг физик-механик хусусиятларига таъсирини ўрганиб чиқилди. Шу мақсадда уларнинг Оже электрон спектроскопияси усули билан аниқланган элемент таркиби вакуумда ёй разрядли ёрдамида пўлат намунаси юзасига ишлов беришдан олдин ва кейинги ҳолат солиштирилди. Намуна юзаси олдин механик усулда тозалаб олинди.

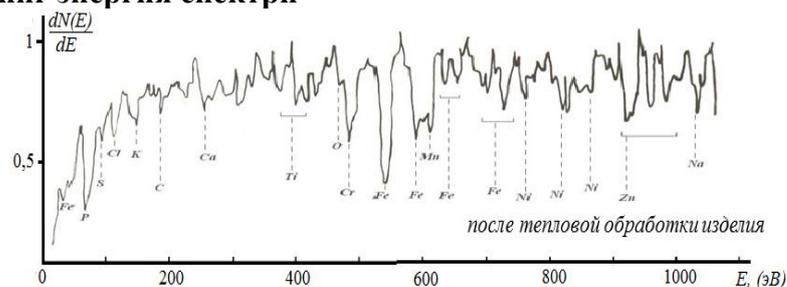
11-расмда сирти олдиндан сайқалланган пўлат намунасининг Оже электронларининг энергия спектри кўрсатилган.

Сайқалланган сиртнинг Оже спектрларида асосий Fe, Mn, C, Ni, Cr, Ti, Zn, P, S, шунингдек керак бўлмаган ишқорий ва оксид элементлари Cl, K, Ca, O, Na, чўққиларнинг энергия спектрида мавжудлиги кўрсатилган, бу эса сезиларли ифлосланишни англатади. Ўрганилаётган намунамизни кераксиз элементлардан тозалаш мақсадида, пўлат намунаси 10^{-3} Па вакуум шароитида, 1500K ҳароратда, 30 дақиқа давомида қиздирилди.

11-расмда бирламчи электронлар энергиясида $E_0 = 2,4 \text{ кэВ}$ бўлган Оже электронларининг энергия спектри кўрсатилган. 11 ва 12 расмлардаги Оже спектрларини таққослаганда намунага иссиқлик билан ишлов бериш жараёнида унинг юзаси P, Cl, S, K ва Ca каби элементлардан тозаланиши (тегишли Оже чўққиларининг интенсивлиги пасаяди) ва Fe, Mn, Cr, Ni ва Ti элементлар билан бойиганлигини кузатишимиз мумкин.



11-расм. Бирламчи, механик ишлов берилган 65Г пўлатнинг сиртидаги Оже электронларининг энергия спектри



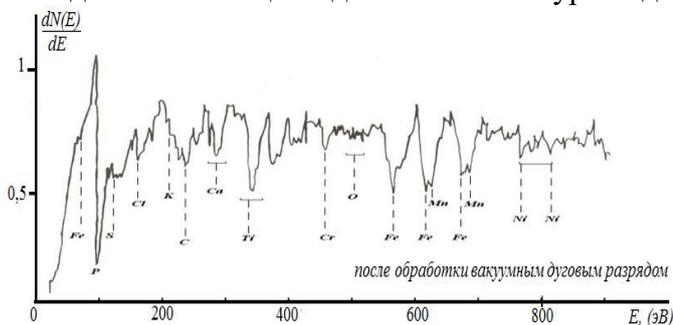
12-расм. Термик ишлов берилгандан сўнг олинган 65 Г маркали пўлат намунасининг Оже электрон энергия спектри.

Ўрганилаётган катод намунасини иссиқлик билан ишлов беришдан сўнг кислороднинг улуши Оже чўққиларининг интенсивлиги кам миқдорда ўзгаради, бу иссиқлик билан ишлов беришдан кейин намуна юзасидаги кислород концентрацияси ўзгармаслигини кўрсатади. Шунинг таъкидлаш керакки, вакуум ёйи плазмаси билан ишлов беришнинг намуна юзасининг элемен таркибига таъсирини ўрганишда дастлабки механик ва иссиқлик билан ишлов беришдан ўтган пўлат намуналарида амалга оширилди.

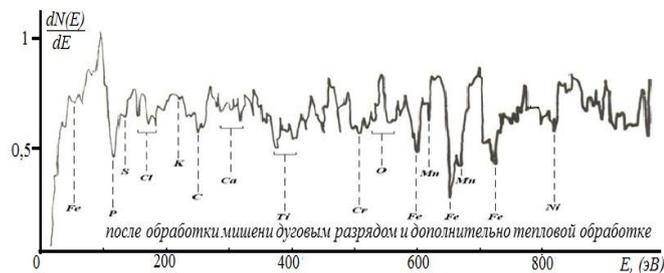
Бундай ҳолда, вакуум-ёйи разряди билан қайта ишланган намуналарнинг бир қисми кейинчалик вакуумда 1200 К ҳароратда 15 дақиқа давомида қўшимча иссиқлик билан ишлов беришдан ўтказилди. 13-14-расмларда пўлат намунани вакуумда ёй разряди билан ишлов берилгандан сўнг сирт сиртнинг Оже электронларининг энергия спектрлари, электронлар бирламчи энергиясида $E_0 = 2,5$ кэВ га тенг.

Бир хил намунадаги 65Г пўлатдан, механик, термик ишлов берилган (11-расм ва 12-расм) ва вакуумда электр ёйи разряд билан ишлов берилган (13-расм ва 14-расм) Оже спектрларини солиштирганда, намунанинг сирт тозалиги вакуум ёйи разряди билан тозаланган пўлатда сезиларли даражада эканлигини кўриш мумкин.

Оже чўққиси интенсивлигининг ошиши ва унинг шакли пўлат намунаси юзасида углерод карбидлар шаклида боғланган ҳолатда эканлигини кўрсатади.



13-расм. Вакуум ёй разряди ёрдамида ишлов берилган пўлат юзасининг Оже спектри, электронларнинг бирламчи энергияси $E_0=2,5$ кэВ



14-расм. Вакуум ёй разряди ва қўшимча термик ишлов берилган пўлат намуналарининг Оже спектри, электронларнинг бирламчи энергияси $E_0=2,5$ кэВ

Сиртда аниқланган Fe, Mn, Cr, Ni, Ti каби элементларнинг Оже чўққиларининг тузилиши, хусусан углерод билан кимёвий боғланишини кўрсатади, яъни бу металлларнинг тегишли карбидларини ҳосил қилиш билан тушунтирилади. Сиртда оксидларнинг мумкин бўлган мавжудлигига келсак, ушбу усулнинг сезирлиги доирасида намуналарни вакуум ёйи билан ишлов беришдан сўнг Оже спектрларида кислородга мос келадиган чўққилар интенсивлиги нихоятда кам эканлиги аниқланди.

Вакуум-ёйли разряд ёрдамида тозаланган сиртнинг микроқаттиқлиги разряд билан ишлов берилмаган дастлабки намунанинг микроқаттиқлиги билан солиштирганда 20-30% га ошади. Қайта ишланган сиртнинг микроқаттиқлигининг ошиши, биринчи навбатда, мартенситдан нуқсонли структуранинг ҳосил бўлиши, нуқсонлар зичлиги ошиши ва қайта кристалланишнинг ривожланиши туфайли юзага келади. Бундан ташқари, вакуум ёйининг катод доғи таъсир зонасида сирт ҳароратининг юқори ўсиши асосий фаза ўзгаришларининг юқори ҳароратлар минтақасига ўтишига олиб келади ва сирт қатламининг диффузиявий тўйиниш жараёни учун махсус шароитлар яратади. Ва бу жараённинг таъсирида

намуналарнинг сирт қатламида аустенитнинг ҳосил бўлиши, уларнинг сиртга яқин қатламининг микрокаттиклигининг ошишига олиб келади.

Кўриб чиқилган комплекс жараён пўлат намуналарининг вакуум ёйи катод доғи таъсир зонасидаги сирт яқинидаги микрокаттиклигининг ошишига, қарши хусусиятларнинг шаклланишига ва металл қатлам ётқизишда юқори ёпишқоқликни таъминлашга имкон беради.

Тозаланган юзага вакуум ёй разряди ёрдамида қатлам ўтқизиш, ва қатлам хусусиятларини ўрганишда нисбатан мураккаб бўлган геометрияли қувурларга қатлам ўтқизиш доирасида кўриб чиқамиз. 10^{-1} - 10^{-2} Па вакуум шароитида 350-450 ток разряди ва ток зичлиги 4-6.1 А/см² бўлган Cr-Ni-Si таркибли P91 маркали пўлат қувурдан фойдаланамиз Разряд давомийлиги 60-120 сек.

Қоплама диаметри 38,0 мм бўлган X10CrMoVNb9-1 (1.4903) мартенсли пўлатдан ясалган қувурнинг ички юзасига ётқизилган. Девор қалинлиги 5,0 мм, қувур намунасининг узунлиги 595 мм (анод вазифасида). Цилиндрсимон катод X15CrNiSi25-20 таркибидаги аустенит пўлатдан ясалган анод ички сиртига қатлам чанглатувчи манба ҳисобланади.

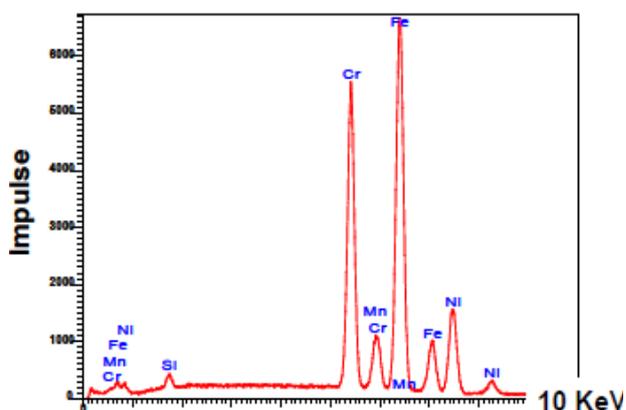
5 -жадвалда катод материалнинг кимёвий таркиби ва қўлланиладиган қопламани кўрсатади. Қалинлиги 20-50 мкм бўлган ҳосил бўлган қопламалар кимёвий таркибга эга бўлиб, асл катод материали билан деярли бир хил ва юқори хромли таркибга эга.

5-жадвал

Қоплама ва катод материалнинг кимёвий таркиби

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Sn	Al
Tube X10CrMoVNb.9.1	0,1	0,31	0,44	0,016	0.002	8,41	0,9 4	0,12	0,006	0,012
Source X15CrNiSi25-20	0,0 45	1,64	1,83	0,024	0.001	24,2	0,1 8	19,7 0		
Coating	0,0 5	1,6	1,7		0.001	25,3	0,1 9	19,2		

Қувурнинг ички сиртига қўлланиладиган қопламали вакуум ёйи катод доғи таъсирида бўлган диаметри 38 мм ва баландлиги 600 мм бўлган кенгайтирилган цилиндрсимон қувур катодининг намуналарини ўрганиш шуни кўрсатдики, қўлланиладиган қопламалар зарур узлукда ва қопламанинг нотекислиги 2-3 фоиздан ошмади.



15-расм. Олинган қатламнинг кимёвий таркиби (рентгенограммаси)

15-расмда намуна қувур ички сиртига вакуум ёй разряди катод доғлари таъсирида қатламнинг структуравий дифрактограммаси келтирилган. Олинган 15-расмдаги дифрактограмма, ётқизилган қопламанинг кимёвий таркиби катод материалга тўғри келади ва вакуум-ёйли ток разряди билан қоплашнинг технологик жараёнида сезиларли даражада ўзгармаслигини кўрсатади. Қопламалардаги хромнинг юқори улуши уларга оксидланишдан ҳимоя

хусусиятларини бериш учун жуда муҳимдир.

Шундай қилиб, 4-бобда олинган натижалар шуни кўрсатади:

- катод юзасини вакуум-ёй билан ишлов беришда ишлов берилган пўлат юзасига калий ва натрий гидроксидларининг (контцентрацияси 25% гача) қопланиши сирт ғадир

будирлиги 1,5-3,2 баравар камайишига, шунингдек, сирти тозалашдаги энергия сарфи (шу жумладан қора шкала) 1,5-2,4 марта пасайишига олиб келади;

- цилиндрсимон қувурларнинг ички сиртига қоламалар бир қопланишини бошқариб турувчи сканерловчи магнет бошқарув тизими ўрнатилди, олинган намунанинг кимёвий таркиби катод материалига мос тушади, қоламалар юқори хром улуши ва бу эса коррозияга чидамли, юқори ёпишқоқликка эга эканлигини кўрсатди;

- цилиндрсимон пўлат намунасининг вакуум ёйи билан сиртни тозалаш (пўлат 65Г) сиртга яқин қатламида қотишма элементларнинг (C, Mn, Cr, Si) тақсимланиши олинди, бу вакуум ёйли катод доғларининг стационар таъсири натижасида ҳосил бўлади.

ХУЛОСА

Диссертациянинг асосий натижалари куйидагилардан иборат:

1. Биринчи марта вакуум ёй разряди шароитида катоддан 200 нм масофада ионлар қатлами юзага келиши, ҳосил бўлган электр майдон кучланганлиги 5×10^7 В/см гача бўлиши ва электрон оқимининг ток зичлиги $\sim 10^6$ А/см² бўлганда нурланиш ва ионларнинг сочилиши туфайли йўқотишлардан кичикдир, ионлар концентрацияси $7,5 \times 10^{19}$ см⁻³ бўлганда ионланиш эҳтимоллиги ($P \leq 1$) яқинлашади.

2. Зарядланган заррачаларнинг оқимлари мос равишда плазма оқимида заррачаларнинг қайта зарядланиши натижаси қалинлиги λ_i бўлган ғовакли диелектрик юзасида ионларнинг чўкиши кабидир, бу эса $\sim 10^7$ В/см ва ундан юқори электр майдонларини ҳосил қилишини кўрсатади.

3. Биринчи марта калий ва натрий гидроксидлари (контцентрацияси 25% гача бўлган) катоднинг ишчи юзасига қўлланилганда, катод юзасига вакуум-ёй таъсирида сирт нотекислигини пасайишига олиб келиши, катод асосининг сирт нотекислиги бир неча марта пасайиши ўз навбатида ионланиш жараёнини енгиллаштириши аниқланди;

4. Вакуум ёйи разрядидаги катод доғлари таъсирида сиртга яқин қатламда фазавий ва структуравий ўзгаришларга олиб келиши аниқланди, бу эса пўлат катодида гамма-аустенит ва альфа-ферритнинг пайдо бўлиши яъни оқ қатлам ҳосил бўлишига олиб келади;

5. Биринчи марта катод намунасининг сиртга яқин қатламида, катод доғи таъсири соҳасида уч зонали ҳарорат тақсимоти юзага келиши, шунингдек, максимал ҳароратга эга зонанинг мавжудлиги аниқланди.

6. Коаксиал металл махсулот ички сиртига қолама қолаш учун вакуум-ёй разряди магнит бошқарув тизими ишлаб чиқилди, қувур ички юзасига қопланган қатлам бутунлай катод махсулотини тақорлаши ва юза текислиги 2-3 % ошмаслиги аниқланди.

ХУДОЙҚУЛОВ ИЛЁС ХОЛМУРАДОВИЧ

**ПРОЦЕССЫ В КАТОДНОМ ПЯТНЕ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО
РАЗРЯДА В УСЛОВИЯХ АВТО- И ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ
ЭМИССИИ**

01.04.04- Физическая электроника

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)
ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент – 2023

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2017.3.PhD/FM117.

Диссертация выполнена в институте ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А. Арифова.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещён на веб-странице по адресу www.iplt.uz и на Информационно-образовательном портале «Ziynet» по адресу www.ziynet.uz.

Научный руководитель:

Ашуров Хатам Бахронович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Максимов Сергей Евлантьевич
доктор физико-математических наук
Камардин Алексей Иванович
кандидат физико-математических наук

Ведущая организация:

Ташкентский государственный технический университет

Защита диссертации состоится «27» 06 2023 г. в 14³⁰ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 по присуждению ученых степеней при Институте ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз (адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 33. Тел./Факс: (99871) 262-32-54, e-mail: info@iplt.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ионно-плазменных и лазерных технологий (зарегистрирована за № 5). Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 33. Тел.: (99871) 262-31-69).

Автореферат диссертации разослан «16» 06 2023 года.
(Реестр протокола рассылки 5 от «16» 06 2023 года).



Х.Б.Ашуров

Председатель Научного совета по присуждению учёных степеней, д.т.н., профессор

И.Д.Ядгаров

Учёный секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней, д.ф-м.н., с.н.с.

Б.Е.Умирзаков

Председатель научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней, д.ф-м.н., с.н.с.

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы. В настоящее время особый интерес к исследованию вакуумного дугового разряда определяется его широким использованием в установках нанесения покрытий на поверхность, обработки и очистки поверхности металлических изделий от различных наслоений, а также в коммутаторах электрического тока и ионных источниках. Основой этого являются широкие энергетические возможности, как воздействия на поверхность катода, так и при формировании плазменных потоков материала катода в катодных пятнах вакуумного дугового разряда.

В последние годы особое внимание уделяется созданию и развитию эффективных методов обработки и нанесения защитных, упрочняющих покрытий на поверхность изделий, направленных на повышение поверхностной стойкости металлических изделий к коррозионному, механическому износу, создание инструментов с высокими потребительскими свойствами. В решении этих задач наряду с традиционными методами ведущее место занимают физические методы и прежде всего ионно-плазменные методы, реализуемые на основе вакуумного дугового разряда.

Для создания новых методов и технологий формирования ионно-плазменного вакуумно-дугового воздействия на поверхность изделий (катода), а также генерации ионных и ионно-плазменных потоков материала катода для обработки, нанесения покрытий, важной научной и технической задачей является исследование процессов генерации ионов, их энергетических параметров в катодной плазме вакуумного дугового разряда, а также характера её воздействия на приповерхностные слои. Особое значение имеет изучение технических условий, обеспечивающих обработку и нанесение покрытий на поверхность сложной геометрии внутренней поверхности металлических трубчатых изделий.

Получение достоверной информации в этой области является важной и актуальной научно-практической проблемой, которая разрабатывается методами физической и катодной электроники. Полученные научные результаты в области вакуумно-дугового разряда являются востребованными для науки и ионно-плазменных вакуумных технологий.

В Республике Узбекистан большее внимание уделяется развитию перспективных направлений фундаментальных и прикладных исследований, в частности, созданию новых наноматериалов, изучению их фундаментальных физических свойств и применению полученных результатов на практике.

В Стратегии дальнейшего развития Республики Узбекистан на 2017 – 2021 годы при высших образовательных и научных учреждениях поставлены задачи «Стимулирование научно-исследовательской инновационной деятельности, создание эффективных механизмов внедрения научных и инновационных достижений научно-исследовательских институтов, научно-экспериментальных специализированных лабораториях и центрах высоких технологий».

Данная диссертационная работа соответствует задачам, предусмотренным в Указе Президента Республики Узбекистан «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» №УП-4947 от 7 февраля 2017 года¹, направлена на выполнение задач, предусмотренных в Постановлении Президента Республики Узбекистан №ПП-1442 «О приоритетных направлениях развития индустрии Республики Узбекистан на 2011-2015 гг.» от 15 декабря 2015 года и в Указе Президента Узбекистана № УП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере и изложенных в соответствующих законодательных актах. Работы такого направления базируются на Законе Республики Узбекистан «О рациональном использовании энергии», №412-1 от 25

¹ Указ Президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2017 года № ПФ-4947 «О стратегии дальнейшего развития Республики Узбекистан».

апреля 1997 г. и других нормативно-правовых документах, направленных на энерго- и ресурсосбережение. Актуальность данного направления подчеркнута в Указе Президента Республики Узбекистан №УП-4947 от 7 февраля 2017 года.

Соответствие исследования основным приоритетным направлениям развития науки и технологий в Республике Узбекистан. Диссертационная исследование выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан: «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение, транспорт, машино- и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации. Вакуумные ионно-плазменные дуговые разрядные технологии интенсивно исследуются в течение многих лет. Библиография работ по вакуумным разрядам, составленная Миллером в 1990 году, насчитывает 4250 наименований, однако, природа дугового разряда вплоть до настоящего времени оставалась наименее понятой. Над решением этой проблемы работали многие выдающиеся ученые: Комптон, Вуд, Штарк, Холл, Лэнгмюр, Фаулер, Милликен, Дайк, Оппенгеймер, Штенбек, Ромпе и др. В 1930-х годах Комптон дал определение вакуумной дуге – это разряд, при очень низком катодном падении потенциала, сравнимым с потенциалом ионизации атомов металла катода. Танберг (1930 г.) показал, что на катод дуги действует сила пропорциональная току дуги, т.е. $F=K_T \cdot I$. А Кимблин (1971г.) определил, что ток ионов в дуге определяется зависимостью $I_i=K_K \cdot I$. Даалдер (1976 г.) установил, что энергия, катоду при фиксированном времени функционирования вакуумной дуги t составляет $W=K_D \cdot I$.

Современное состояние теории вакуумной дуги формировалось Г. Эккером. Катодные явления изучались Л. Харрисом, а анодные Дж. Добайном, современное состояние вакуумной коммутационной техники дано А. Гринвудом. Однако, имеются противоречия в оценках их результатов. Так, в работах Дж. Фаррелла, Г. Эккера, и Л. Харриса проведены исследования плотности тока в катодном пятне. Академик РАН Г.А.Месяц в Томском политехническом университете, совместно с сотрудниками Института сильноточной электроники СО РАН и Института электрофизики УрО РАН, предположили, что эмиссия электронов в катодном пятне – это процесс порционный, обусловленный взрывами струй жидкого металла, что объясняло огромные электронные токи эмиссии электронов. Результаты исследований катодных процессов в области катодного падения потенциала, полученные российскими учеными: И.Г. Кесаев, Г.А. Месяц, М.А. Яландин, В.М. Куляпин, А.Н. Серьезнов, М.Ф. Жуков, А.С. Коротеев, Г.Ю. Даутов, Б.И. Михайлов, О.Б. Брон, А.М. Смыслов, В.С. Мухин и др., имеют важное значение для науки и техники. Развитие теории и математическое моделирование процессов в компонентах электротехнических комплексов и систем является актуальной и востребованной научной проблемой.

Степень изученности проблемы. Исследование природы вакуумно-дугового разряда и основных характеристик вакуумно-дуговой плазмы предполагает развитие соответствующих моделей физических процессов разряда и генерации плазмы на поверхности металлических катодов, а также использование соответствующих приборов и оборудования, работающих на основе различных электрофизических методах, имеющих высокие аналитические возможности. Используемые в настоящей работе, методы диагностики и исследования ионно-электронных процессов, происходящих в вакуумно-дуговой плазме и на поверхностях электродов различных материалов, достаточно хорошо изучены.

В то же время, очевидно, что прямая реализация этих методов невозможна без создания соответствующих методико-теоретических основ элементарных процессов, происходящих на поверхности катода и в ионно-плазменных потоках. Эти основы представляют собой набор процедур, целенаправленный алгоритм действий, выбор необходимых критериев и допущений, а также использования аналитических приборов, в том числе электронных Оже-спектрометров и др. Такой комплексный теоретический и экспериментальный подход должен обеспечить возможность получения надежных данных в исследовании особенностей движения заряженных частиц и состава плазмы дугового

разряда, а также элементарных процессов на поверхности источника плазмы - металлического катода.

Так, например, в Новосибирске, в Институте ядерной физике СО РАН, Г.А. Месяц, С.П. Бугаев и Д.И. Проскуровский провели оценку параметров эктонного цикла в катодной ячейке. Соответствующие эксперименты проводились в научных учреждениях ряда стран России, Великобритании, Германии, США, Франции и Японии.

Идентификация процессов в катодной ячейке в итоге показала, что вакуумная сильнотоочная дуга – это не стационарный процесс, а порционный, и что происходит он в жидком металле и затем переходит в плазму. Подтверждением этому служат законы вакуумной дуги, которые, впрочем, не нашли однозначного подтверждения в существующих теориях.

В то же время, отсутствие математических методов расчета параметров катодных процессов определено недостаточной изученностью процессов воздействия электрических разрядов на материалы и отсутствием аналитических методов решения нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих процессы при действии поверхностных источников электрического разряда и объемного тепловыделения.

Связь диссертационного исследования с планами научно- исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа была выполнена по плану научно- исследовательских работ Института Ионно-плазменных и лазерных технологий в рамках следующих проектов: № АЗ-ФА-Ф173. «Разработка разрядной системы вакуумно- дугового источника плазмы для обработки поверхности изделий и нанесения на них защитных покрытий», (2012-2014); ФА-АЗ-062 «Разработка технологии ионно- плазменного осаждения покрытий в условиях ионной бомбардировки и синтеза в реактивном газе» (2014-2018).

Целью диссертационного исследования является повышение эффективности ионно-плазменного воздействия катодных пятен вакуумного дугового разряда с помощью определения влияния на структуру и другие свойства поверхностных слоев, обработанных катодными пятнами вакуумного дугового разряда, путем изучения процессов вакуумно-дугового разряда катодные пятна в условиях авто- и термоэлектронной эмиссии.

Поставленная цель достигается в рамках проведения теоретических и экспериментальных исследований процессов, происходящих в катодном пятне вакуумного дугового разряда, путем решения следующих **основных задач исследования:**

расчетное математическому изучению процессов зарядовой системы частиц, создание модели в катодном пятне вакуумного дугового разряда, в области катодного падения потенциала и определение параметров, оказывающих наибольшее влияние на процессы ионизации и перезарядки ионов генерацию высокоэнергичных ионов в формируемом этим зарядом электрическом поле

экспериментальное определение влияния наличия на поверхности катода поверхностно активных веществ на характер воздействия плазмы катодного пятна на поверхность катода, а также на энергозатраты и шероховатость поверхности катода

определение теоретическим расчетным исследованием параметров распределения тепловой энергии в приповерхностном слое катода, создаваемого в результате теплового ионно- плазменного воздействия катодных пятен, его влияния на свойства, структуру приповерхностных слоев, обработанных катодными пятнами вакуумного дугового разряда;

Изучение характера фазовых структурных, элементных, изменений в приповерхностном слое стального образца формирующихся в результате стационарного воздействия катодных пятен вакуумной дуги при очистке поверхности вакуумным дуговым разрядом.

определение условий реализации эффективного ионно-плазменного воздействия вакуумного дугового разряда для реализации процессов очистки внутренней поверхности металлического трубчатого изделия и нанесения покрытий управлением катодными пятнами магнитным полем в коаксиальной конструкции вакуумно-дугового устройства с протяженным цилиндрическим катодом.

Объектами исследования являются вакуумный дуговой разряд, его катодные пятна, воздействующие на поверхность катода.

Предметом исследования являлись процессы ионизации частиц в катодном пятне и плазме вакуумного дугового разряда, а также ионно-плазменного воздействия катодных пятен на поверхность, в том числе внутреннюю поверхность металлического трубчатого катода, активированную соединениями щелочей и кислот.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы применены следующие методы исследования: - теоретические расчетные исследования проводились с использованием методов математического моделирования для нестационарных процессов и характера воздействия катодных пятен на поверхность; - экспериментальные аналитические методы, в том числе Оже-электронная спектроскопия, рентгеноструктурный анализ, и профилометрия для исследования шероховатости поверхности с использованием профилометра Mitutoyo SurfTest 401.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработана математическая модель нелинейных нестационарных процессов ионизации в области катодного падения потенциала в катодном пятне вакуумного дугового разряда на «холодном» катоде. Определено, что система зарядов приобретает энергию за счет ускорения эмитированных электронов потенциалом катодного пятна (КП) и затрачивает ее в основном на ускорение ионов и разогрев электронного газа;

впервые установлено, что на расстоянии 200 нм от катода вакуумно-дугового разряда создается слой ионов, формирующий электрическое поле напряженностью до 5×10^7 В/см, потери на излучение и рассеяние ионов при плотности электронного тока $\sim 10^6$ А/см² невелики, вероятность ионизации атомов близка к единице вплоть до концентраций $7,5 \times 10^{19}$ см⁻³, а при больших концентрациях, вероятность ионизации уменьшается, как следствие перезарядки ионов;

разработана математическая модель структуры распределения тепловой энергии в приповерхностных слоях металлического катода при воздействии катодных пятен вакуумного дугового разряда, как перемещающегося точечного источника тепловой энергии по поверхности изделий различной геометрии. Определено формирование в приповерхностном слое катода-образца трехзонной структуры распределения температуры, в области воздействия катодного пятна (размер КП 2-5 мкм, температура 4000-5000С), а также наличие зоны с максимальной температурой;

определено, что тепловое воздействие катодного пятна вакуумной дуги приводит к формированию в приповерхностном слое катода особого «белого слоя», толщиной от 2 мкм до 20 мкм, в основе которого лежит «расслоение» приповерхностного участка на зоны с фазовыми (появление аустенита), структурными (микронапряжения второго рода) образованиями с измельчением блоков мозаики до 0,1-0,2 мкм;

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

впервые обнаружено, что нанесение покрытия гидроксидов калия и натрия (с концентрациями до 25%) на обрабатываемую стальную поверхность при вакуумно-дуговой обработке поверхности катода приводит к снижению шероховатости поверхности в 1,5–3,2 раз, а также к уменьшению энергозатрат на очистку поверхности от поверхностных наслоений (в т.ч. окалины) в 1,5–2,4 раза;

впервые установлены, предложены и реализованы оригинальные методики магнитного сканирования катодных пятен вакуумного дугового разряда по поверхности катода в коаксиальной электродной системе и нанесения покрытия на внутреннюю поверхность в конструкции вакуумно-дугового устройства с протяженным цилиндрическим катодом, и показано, что покрытия имеют необходимую сплошность, их химический состав соответствует материалу катода, а высокое содержание хрома в покрытиях является существенным для их защитных свойств против окисления.

получено распределение легирующих элементов (С, Mn, Cr, Si) в приповерхностном слое цилиндрического стального образца (сталь 65Г), формирующееся в результате

стационарного воздействия катодных пятен вакуумной дуги при очистке поверхности вакуумным дуговым разрядом.

Достоверность результатов исследований обеспечивается использованием современных экспериментальных и теоретических методик, хорошим соответствием полученных результатов с данными других авторов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость: выявлены механизмы ионизации в катодном пятне вакуумного дугового разряда, формирования высокоэнергетических ионов в плазме, характер теплового воздействия катодного пятна на поверхность катода, которые приводят к фазовым (появлению аустенита), структурным (микронапряжениям второго рода и измельчению блоков мозаики) изменениям приповерхностного слоя и к формированию особого «белого слоя», обеспечивающим антикоррозионные и упрочняющие свойства, которые имеют важное значение для развития теории ионно-плазменного взаимодействия заряженных частиц с поверхностью.

Практическая значимость: созданы технические системы вакуумно-дуговой обработки внутренней поверхности трубчатых изделий, нанесения на неё функциональных покрытий с контролируемыми физическими свойствами, обеспечивающих необходимый ресурс высоконагруженных технических устройств.

Внедрение результатов исследования. На основе результатов исследований по оптимизации процесса воздействия катодными пятнами вакуумной дуги на внутреннюю поверхность трубчатых изделий получен патент РУз на способ обработки внутренней поверхности металлической трубы IAP 05070, Бюллетень 8(172), 2015г., где использовались результаты комплексных аналитических и экспериментальных исследований воздействия катодных пятен вакуумной дуги на поверхность стальных изделий различной геометрии, в том числе трубчатых. Данная задача была успешно решена благодаря разработанной методике формирования замкнутого коаксиального пространства электродной системы реализации процесса воздействия катодными пятнами вакуумного дугового разряда на внутреннюю поверхность вертикально расположенного трубчатого изделия, являющегося элементом системы, образующей вакуумированное рабочее пространство и электроразрядный процесс.

Полученный патент РУз, IAP 05778, 3(215), 2019г. на способ вакуумно-дуговой обработки внутренней поверхности труб использован в аналитических и экспериментальных исследованиях комплексного воздействия катодных пятен вакуумной дуги на поверхность стальных трубчатых изделий.

Данная задача расширения функциональных возможностей технологического воздействия вакуумного дугового разряда на поверхность металлических изделий с целью придания необходимых функциональных свойств, повышения эффективности и качества процесса обработки, была успешно решена благодаря методике формирующей комплексную обработку внутренней поверхности металлической трубы двумя одновременно функционирующими вакуумными дуговыми разрядами.

Применение научных результатов, полученных в диссертации, позволило эффективно очищать и осаждать защитные покрытия на внутренней поверхности трубчатых изделий (Справка АК Узэлтехсаноат № 04–3/474 от 24 марта 2022г.).

Апробация результатов исследования. Основные результаты работы доложены и обсуждены на 11 Международных научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования.

Основные результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 21 научных трудах, из которых 10 статей в научных журналах, в том числе 2 патента, 3 в зарубежных и 5 в республиканских журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций.

Структура и объем диссертации. Структура диссертации состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации содержит 115 страниц текста, включая 39 рисунков и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и востребованность проблемы, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, оценивается научная новизна и практическая значимость, и использование полученных результатов.

В первой главе диссертации «Вакуумно - дуговой разряд и принципы генерации потоков металлической плазмы» приводится обзор современных литературных данных. Результаты анализа экспериментальных и теоретических работ показывают, что в настоящее время большое внимание уделяется изучению: влияния параметров вакуумно-дугового разряда на процесс ионизации; структуре катодных пятен; структурным изменениям поверхности металлического катода вследствие температурного воздействия катодных пятен. Это связано с перспективами получения сверхчистых металлов, создания интенсивных потоков «металлической» плазмы для применения технологий имплантации и получения различных покрытий, сильноточных пучков заряженных частиц и коммутационной техники.

Однако, во всех случаях необходим анализ процесса ионизации в плазменных образованиях на катоде –катодных пятнах, а также расчет распределения температуры в приповерхностном слое катода в зоне воздействия катодного пятна (точечного источника тепловой энергии) с различной геометрией катода.

На основании выполненного анализа показано, что процессы ионизации и распределения температуры на поверхности катода достаточно не исследовались. Эти мало изученные проблемы послужили основой для определения целей и реализации задач диссертационной работы.

Вторая глава «Экспериментальная установка и методика исследования» посвящена описанию экспериментальных электродных систем реализации вакуумного дугового разряда и методов исследования. Основные эксперименты проводились на вакуумных установках, разработанных и изготовленных в Лаборатории ионно-плазменных технологий Института ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А.Арифова АН РУз. Для выполнения поставленных в работе задач необходимо было провести технологическую обработку катодными пятнами вакуумной дуги образца катода в одном и том же устройстве, в условиях вакуума (очистка поверхности, влияние теплового и ионно-плазменного воздействия катодных пятен на поверхностные и приповерхностные слои и изучение их физических свойств). Эксперименты проводились на установках вакуумный универсальный пост (ВУП), комплексной и вертикальной вакуумной технологической установках.

Полученные результаты анализировались с помощью тестера шероховатости Mitutoyo SurfTest SJ 401, Твердометра ПМТ-3, дифрактометра ДРОН-2, микроскопа МИМ-8М и Оже- спектрометра.

Эти методы в совокупности позволили обеспечить: исследование шероховатости обработанной поверхности металлического образца; его приповерхностной твердости; анализ структурных изменений на поверхности металла после температурного воздействия, проведение оценки элементов на поверхности образца.

В третьей главе «Процессы генерации заряженных частиц на катоде вакуумного дугового разряда» рассмотрены особенности пространственного заряда, прилегающего, с одной стороны к катоду с высокой электропроводностью, а с другой - к струе хорошо проводящей квазинейтральной плазмы, а также решены уравнения для распределения температуры в приповерхностном слое области воздействия движения катодного пятна вдоль образца.

В первом случае использована модель плоскости, в которой потенциал $U=U_{\max}$ - максимален, напряженность поля $E_0=0$, а суммарные заряды, находящиеся по обе стороны от этой плоскости равны друг другу. При этом на поверхности катода наводится отрицательный заряд, а область положительно заряженной части пространственного заряда отделена от плазмы участком, где концентрация электронов превышает концентрацию

ионов. На рис.1 представлена схема области пространственного заряда в катодном пятне вакуумной дуги у поверхности катода, иллюстрирующая процесс ионизации и формирования объемного заряда.

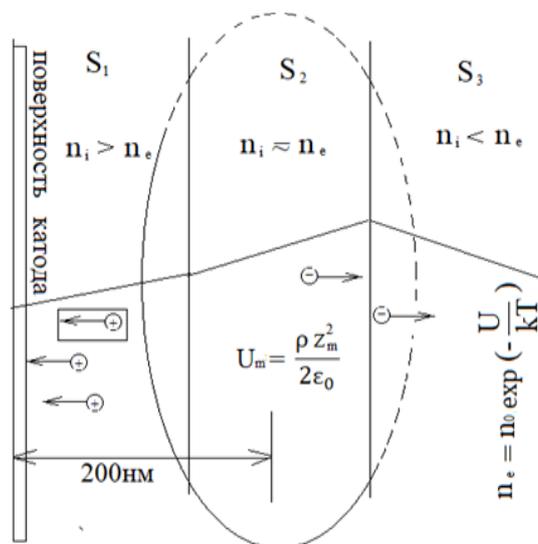


Рис.1. Модель переходных процессов ионизации у поверхности катода.

Образование объемного заряда в области катодного пятна вакуумной дуги происходит на расстоянии нескольких нанометров от поверхности катода и обусловлено хаотическим движением заряженных частиц, генерируемых в нем. Формируемая на расстоянии 200 нм область максимального значения ионного скопления относительно поверхности катода разделяет область пространственного заряда (катодного падения потенциала) на три зоны.

Область объемного зарядов, а S_3 состоит из ионов высокой плотности на близких к катоду расстояниях, бомбардирующих поверхность катода., Этот плазмоидный слой генерирует электрическое поле с напряженностью 10^7 В/см, что приводит к резкому увеличению

эффективности процесса ионизации. На расстоянии $Z > 200$ нм от поверхности катода влияние объемного заряда в зоне S_3 уменьшается за счет уменьшения разности потенциалов (между катодом и объемным зарядом КП) и увеличения концентрации электронов S_3 зоны.

На рис. 2 представлен ход изменения потенциальной энергии электронов и однозарядных ионов, как функции расстояний от катода, а также характерные координаты, поясняющие энергетику прикатодных процессов.

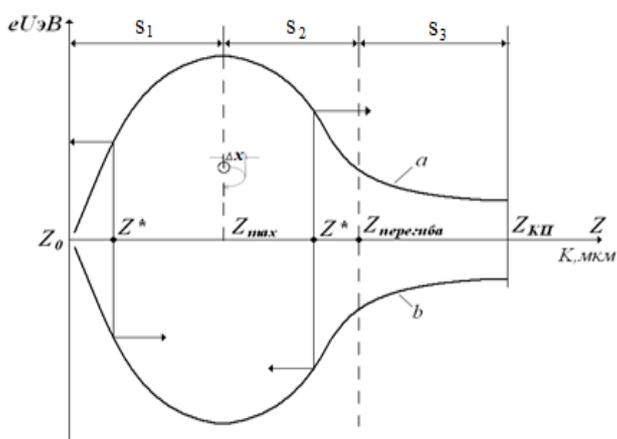


Рис.2 Изменение потенциальной энергии в катодном пятне вакуумной дуги на различных расстояниях от катода: а-электронов, в-ионов;

ионного заряда в области ионизации, при удалении из неё “новых” электронов. Таким образом, в первой зоне S_1 ионы ускоряются к катоду, а во второй зоне S_2 и третьей зоне S_3 – ионы движутся к аноду, и не встречая потенциальных барьеров, покидают рассматриваемую область.

Для более детального анализа условий в первой зоне S_1 необходимо решить уравнение $\nabla \times E = 4\pi r$. Принимая массу иона $9,3 \times 10^{-26}$ кг и радиус атома равным радиусу атома железа $1,27 \text{ \AA}$, получим, что концентрация электронов в зоне S_1 не превышает 3% от концентрации ионов. Тогда, пренебрегая электронами, имеющимися в зоне S_2 ионного скопления, и предполагая постоянство концентрации ионов, можно получить приближительные решения уравнения Пуассона (3) в виде:

$$U = U_M \left[1 - \left(\frac{Z}{Z_M} - 1 \right)^2 \right], \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial Z} = 2U_m \left(\frac{Z}{Z_m} - 1 \right) \frac{1}{Z_m}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} = -\frac{2U_m}{Z_m^2} - \frac{2U_m}{Z_m^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}, \quad (3)$$

На расстоянии 200 нм напряжение достигает своего максимального результата. На основании формулы (4) вычисляем максимальное значение напряжения

$$U_m = \frac{\rho Z_m^2}{2\varepsilon_0} \quad (4)$$

Когда напряжение достигает своего максимального значения, процесс ионизации уменьшается согласно зависимости $1/Z_m$.

Область пространственного заряда прикатодной плазмы (катодного пятна), представленная на рис.1, разделена соответствующими сечениями на три зоны: перезарядки, упругого соударения атомов и ионизации электронным ударом. Напряженность электрического поля, создаваемого объемным зарядом тока ионов на катод в КП вакуумной дуги, определяется формулой Маккоуна, которую с учетом $\left(\frac{m_e}{m_i}\right)^{0,5} \gg 1$ можно привести к виду:

$$E_c^2 = 3,26 \cdot 10^7 U_c^{0,5} A_c^{0,5}, \quad (5)$$

где A_c – атомный вес катода. Тогда и основное падение потенциала будет локализовано в области свободного пробега ионов, следовательно, электроны достигают области III, имея энергию, соответствующую величине потенциала катодного падения. При этом величина напряженности электрического поля в области II и III будет существенно ниже. Вероятность ионизации каждого атома в катодном пятне будет равна

$$P = n_e v_e \sigma_e \tau_a, \quad (6)$$

где n_e и v_e – соответственно концентрация и скорость электронов; σ_e – сечение ионизации атома электронами с энергией E_e ; τ_a – время нахождения атома в ионизационной области III.

В табл. 1 приведены полученные расчетные значения скорости испарения материала катода, температуры КП и концентрации атомов на расстояниях $\sim Z$. Результаты расчетов потоков, скорости испарения, температуры пятна и концентрации атомов в потоке для медного катода при различных E на расстояниях $\sim \lambda_i$ от катода, представленные в табл. 1, показывают, что при соответствующих потоках результат перезарядки подобен осаждению ионов на поверхности пористого диэлектрика толщиной Z_i , при котором возникают поля $\sim 10^7 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$ и более.

Таблица 1

Расчетные значения скорости испарения материала катода, температуры КП и концентрации атомов на расстояниях $\sim Z$

$E, \text{ В/см}$	$v_a, \text{ Г/см} \times \text{ с}^{-1}$	$G, \text{ Г/см}^2 \times \text{ сек.}$	$T, \text{ К}$	$n_a, \text{ см}^{-3}$
10^4	$7.5 \cdot 10^{22}$	8	2850	$7.75 \cdot 10^{17}$
10^5	$7.5 \cdot 10^{23}$	80	3400	$7.1 \cdot 10^{18}$
10^6	$7.5 \cdot 10^{24}$	800	4350	$6.25 \cdot 10^{10}$

При увеличении температуры катодного пятна область перезарядки ионов приближается к катоду, до расстояний $\sim 200 \text{ нм}$. При катодном падении потенциала 10 – 20 В создаются поля с напряженностью $\sim (2-5) \times 10^7 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$. При подобных полях громадные плотности тока ($10^7-10^8 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$) термоавтоэлектронной эмиссии разогревают катод джоулевым теплом и теплом Ноттингама, приводя к соответствующему взрыву эмиттера. В результате этого взрыва катодное пятно разрушается, чем, по-видимому, и объясняется очень малая (несколько мкс) продолжительность существования элементарных катодных

пятен и дугового разряда в области малых токов. При увеличении тока дуги (увеличении числа пятен) отдельные взрывы – распады не играют большой роли в общем дуговом цикле, что приводит к увеличению вероятности возникновения разряда.

Важное значение при рассмотрении движения катодных пятен вакуумного разряда имеет температурное поле, формируемое в цилиндрическом электроде. Формируемое подвижное температурное поле в приповерхностных слоях образца, при длительном воздействии на его поверхность подвижного сосредоточенного источника постоянной мощности, стремится к предельному квазистационарному состоянию и характеризуется неизменностью во времени. Это предельное состояние устанавливается после длительного действия подвижного источника, которым являются катодные пятна.

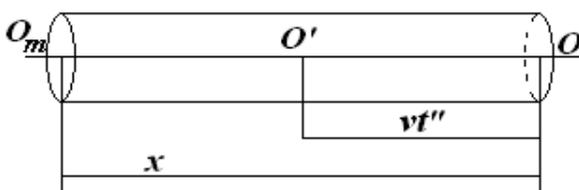
При нагреве быстродействующим точечным источником приповерхностного слоя образца предельное состояние в области, близкой к источнику, предельное состояние наступает вскоре после начала процесса. В решаемой задаче требуется найти распределение температур в приповерхностном слое полуограниченной трубы с радиусом r с теплоизолированными границами, с нулевым начальным распределением температур, если вдоль неё движется со скоростью v_0 точечный источник мощности Q . Выберем систему координат так, чтобы ось Ox была направлена вдоль бесконечной границы трубы, а ось Oy - перпендикулярно к ней. Тогда в системе координат $ХОУ$: $0 \leq x < \infty, 0 \leq y \leq r$, а источник тепла перемещается вдоль прямой $y = y_0$.

Температурный поле формируемое в приповерхностном слое цилиндрического образца под воздействием КП ВДР определяется выражение:

$$T(x, y, \tau, r) = \frac{Q}{c\rho a\sqrt{\pi l}} \int_0^\tau \left(\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\left(\frac{an\pi\Delta r}{l}\right)^2 (\tau-\theta)} \cos \frac{n\pi}{l} y_0 \cos \frac{n\pi}{l} y \right) \times \left(e^{-\frac{(x-v_0\theta)^2}{4a^2(\tau-\theta)}} + e^{-\frac{(x+v_0\theta)^2}{4a^2(\tau-\theta)}} \right) \times \frac{1}{\sqrt{\tau-\theta}} d\theta \quad (7)$$

Кроме того, из предельных уравнений температур с определённым приближением получается уравнение изотерм, характеризующее изучаемый процесс. Для получения этих предельных уравнений, положим в (7) $(\tau - \theta) = t''$, откуда $\theta = \tau - t''$.

На рис. 3 представлена проекция $O'O_m$ на ось Ox расстояния до точки наблюдения M в момент времени τ . Как следует из рис.3. величина $x - v_0(\tau - t'')$ есть проекция на ось Ox расстояния до точки наблюдения M в момент времени τ , т.е. $O'O_m = x - v_0(\tau - t'')$. Если положить $O'O_m = x + v_0 t''$, где x - есть расстояние от источника до точки наблюдения, а t'' -



время распространения тепла мгновенного источника, предшествующие рассматриваемому моменту времени, тогда для $T(x, y, \tau)$ получим

$$T(x, y, \tau) =$$

Рис. 3 Проекция движущегося теплового источника со скоростью v на ось Ox расстояния до точки наблюдения O_m в момент времени τ

$$\frac{Q}{c\rho a\sqrt{\pi l}} \int_0^\tau \left(\frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\left(\frac{an\pi\Delta r}{l}\right)^2 t''} \cos \frac{n\pi}{l} y_0 \cos \frac{n\pi}{l} y \right) e^{-\frac{(x+v_0 t'')^2}{4a^2 t''}} \frac{1}{\sqrt{t''}} dt'', \quad (8)$$

Так как скорость перемещения точечного источника по образцу велика, $v_0 \geq 10$ см/сек, то предельное уравнение температур примет вид:

$$T(\tau, y, \infty) = T_0 \left(\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\left(\frac{an\pi}{l}\right)^2 \tau} \cos \frac{n\pi}{l} y_0 \cos \frac{n\pi}{l} y \right), \text{ при } x < 0, \quad (9)$$

$$\text{и } T(x, y, \infty) = T_0 e^{-\frac{v_0^2 \tau}{a^2}} \left(\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\left(\frac{an\pi}{l}\right)^2 \tau} \cos \frac{n\pi}{l} y_0 \cos \frac{n\pi}{l} y \right), \text{ при } x > 0, \quad (10)$$

Из формул (9) и (10) следует, что предельные уравнения температур при $x < 0$ и $x > 0$ отличаются друг от друга множителем $\exp\left(-\frac{v_0^2 \tau}{a^2}\right)$, т.е. предельные температуры для точек области, в которой ещё источник не появился, в $\exp\left(-\frac{v_0^2 \tau}{a^2}\right)$ раз меньше температур в соответствующих точках, в которых источник уже прошёл.

При $x \rightarrow \infty$, т.е. для точек, удалённых от источника, температура стремится к стационарному состоянию, описываемому как:

$$\frac{T_0}{2} = \frac{Q}{c\rho l v_0} \quad (11)$$

Изотермы в теле образца для стали 45, формирующиеся при воздействии катодного пятна соответствующие высоким температурам $T=1000-1500$ 0С имеют вид замкнутых кривых, а изотерма более низких температур порядка $T=300-600$ 0С асимптотически приближается к оси ОХ при $x \rightarrow 0 (\tau \rightarrow 0)$. В случае образца в виде цилиндра радиусом r , решение представлено выражением (10).

Вторым необходимым этапом рассмотрения распределения температурного поля в приповерхностном слое образца, создаваемого при движении точечного источника тепла (катодного пятна), вдоль поверхности по прямой $y_0 = 1/2$. является решение уравнения изотерм.

В цилиндрическом образце из наименее теплопроводной стали, например сталь 45, зоны ограниченные изотермами одинаковых температур при $x < 0$, имеют наибольший радиус, изотермы более вытянуты в направлении, обратном направлению перемещения теплового источника. Изотермы одинаковых температур, соответствующие более теплопроводным сталям (65Г, 08КП) становятся короче при $x > 0$, а по конфигурации приближены к окружности. При $x < 0$ для более теплопроводных металлов, зоны ограниченные изотермами одинаковых температур, напротив, имеют больший радиус, чем у менее теплопроводных металлов. Это объясняется тем, что прилегающие к источникам зоны у более теплопроводных металлов нагреваются быстрее, чем соответствующие зоны менее теплопроводных металлов. В зонах, в которых тепловой источник уже прошел $x < 0$, происходит процесс остывания и у более теплопроводных металлов потеря тепла

происходит значительно интенсивнее. Поэтому, в этих зонах более теплопроводных металлов температуры ниже, чем в соответствующих зонах менее теплопроводных металлов.

В результате получены три зоны, ограниченные кривыми $\theta_1(\tau)$, $\theta_2(\tau)$, $\tau = 0$ ($x = 0$). Зона I является зоной высоких температур, зона II – низких, и является предельной температурой, разделяющей зоны I и II. Зона III соответствует переднему фронту движения температуры волны, появляющемуся в момент $\tau = 0$ в точке $x = 0$. Из рис.4 видно, что в силу тепловой изоляции на границе образца и отсутствия теплообмена с окружающей средой, в точках, пройденных тепловым источником (катодным пятном), в зоне воздействия источника в

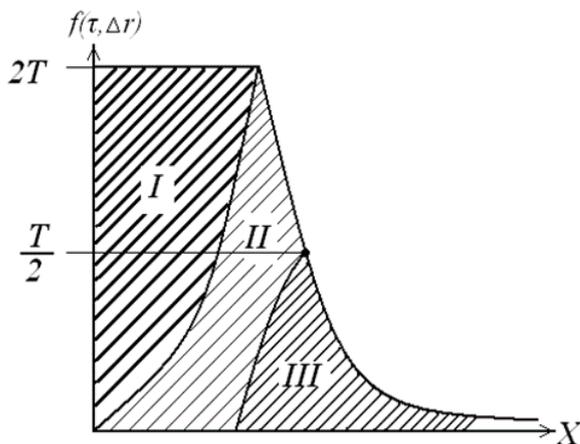


Рис.4. Распределение температуры в приповерхностном слое в области воздействия КП ВДР. ($\theta_2(\tau)$ в области, соответствующей $x < 0$, а $\theta_1(\tau)$ - $x > 0$.)

приповерхностном слое образца установится предельная температура $T/2$ на границе I и II фронта.

На рис.5. показано полученное нами на основе проведенного расчета распределение температуры в зоне воздействия катодного пятна (микроратеров) на поверхности катода в момент взрыва материала. Из рис. 5. видно, что на глубине 0,2 мкм температура катодного пятна повышается до 2500 К, что и является причиной образования «белого слоя».

Таким образом, в результате рассмотрения этих особенностей зарядового состава вакуумного плазменного разряда и распределения температурного поля при движении

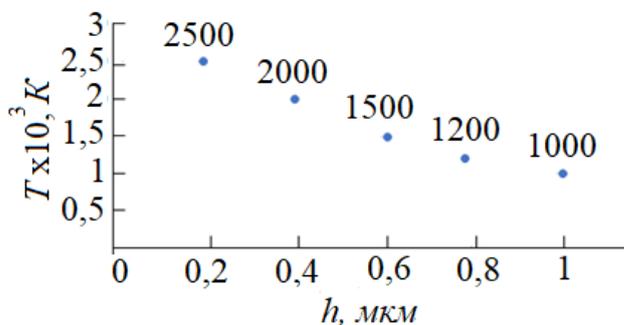


Рис. 5. Распределение температуры от поверхностного слоя образца до глубины 1 мкм.

катодных пятен вдоль поверхности катодного образца показано, что распределение зарядов в объеме дугового разряда и температурного поля при движении катодных пятен являются наиболее существенными показателями при реализации вакуумно-дугового разряда с быстро перемещающимися по поверхности катодными пятнами (КП), а также получены следующие важные результаты:

- разработана математическая модель нелинейных нестационарных процессов ионизации в области катодного падения потенциала в катодном пятне КП вакуумного дугового разряда на «холодном» катоде. Определено, что система зарядов приобретает энергию за счет ускорения эмитированных электронов потенциалом и затрачивает ее в основном на ускорение ионов и разогрев электронного газа;

- разработана математическая модель структуры распределения тепловой энергии в приповерхностных слоях металлического катода при воздействии КП вакуумного дугового разряда, как перемещающегося точечного источника тепловой энергии по поверхности изделий различной геометрии.

- путем решения уравнений распределения температурного поля в катоде-образце при вакуумно-дуговом разряде установлено формирование в приповерхностном слое катода-образца трехзонной структуры распределения температуры, в области воздействия катодного пятна (размер которого 2-5 мкм, температура 4000-5000⁰C), а также наличие зоны с максимальной температурой.

В четвертой главе «Характер воздействия катодной плазмы на поверхность катода» изучены процессы эрозии поверхности катода, покрытой поверхностно активными веществами (ПАВ), что осуществлялось в электродном устройстве, расположенном в вакуумной камере. Образцы для испытаний были изготовлены из стали X8Cr17 (стандарт DIN17440) и 08X18H10 (ГОСТ 5632-72) с окисным слоем (окалиной) толщиной 5 мкм (табл.2). Сталь 08X18H10 аустенитная коррозионнотойкая, а сталь X8Cr17 характеризуется отсутствием никеля, низким содержанием углерода, более высокой жаропрочностью, устойчивостью к коррозии в серосодержащих средах. Поверхностная концентрация наносимого вещества на поверхность металлического катода из водного раствора щелочей или кислот была пропорциональна концентрации этого водного раствора, что позволило

Таблица 2

Химический состав исследуемых сталей.

Марка стали	Компоненты, %						
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
08X18H10	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	18.0–20.0	8.0–10.5
12X17	0.12	1.0	0.04	0.03	1.0	16.0–18.0	0.75

провести исследования зависимости шероховатости поверхности исследуемого катода и площади воздействия катодных пятен (КП) от концентрации щелочей КОН и NaOH.

Воздействие КП на поверхность стального катода проводили при токе вакуумного дугового разряда 140-340А, что соответствовало поверхностной плотности заряда 6 Кл/см². Нанесение на поверхность образца 10% раствора щелочи КОН, соответствует ее поверхностной концентрации 0,001 г/см². В табл.3 представлены данные по влиянию нанесения водных растворов КОН и NaOH на удельные энергозатраты вакуумно-дуговой обработки и шероховатость поверхности исследуемого образца катода из сталей 08X18H10T и X8Cr17.

Таблица 3

Влияние соединений щелочных металлов на энергозатраты вакуумно-дуговой обработки и шероховатость поверхности стального катода

Вещество	Марка стали	Шероховатость, Ra	Шероховатость, Rmin	Удельные энергозатра, кВт×ч/м3
Без СВ	12X17	10,2	58,5	5,82
КОН 10%	08X18H10	5,4	31	2,71
КОН 20%	08X18H10	4,3	25,4	2,57
КОН 25%	08X18H10	4,0	30,7	2,8
Без СВ	12X17	11,9	51,8	5,98
КОН 20%	12X17	3,8	19,2	2.63
КОН 25%	12X17	4,1	21,4	3,42
NaOH10%	12X17	7,8	34,1	2,85
NaOH 20%	12X17	6,8	31,0	3,0
NaOH 25%	12X17	8,3	36,5	3,65

Как видно из табл.3 при концентрации водных растворов щелочей 20% происходит снижение общих энергозатрат в 1,5-2,4 раза, а уменьшение шероховатости поверхности - в 1,5-3,2 раза. Установлено, что шероховатость поверхности с увеличением концентрации щелочи на поверхности быстро уменьшается до величины, меньшей в ~2,5 раза исходного значения, при концентрации щелочи 10-15%. Дальнейшее повышение концентрации щелочи приводит к небольшому увеличению шероховатости поверхности. На образце катода из стали марки 08X18H10, при 20% концентрации КОН, шероховатость поверхности снижается в 2,4 раза, а энергозатраты снижаются в 2,2 раза. В случае стали марки 12X17 содержание NaOH 20% уменьшилось в 1,8 раза, а энергоемкость процесса в 1,9 раза. Существенное изменение наблюдалось для стали 12X17 при концентрации 20% КОН и было установлено, что энергозатраты снизились в 2,27 раза и в 3 раза.

Характерные профилограммы поверхности образца стали 08X18H10, обработанного механическим методом и КП вакуумного дугового разряда представлены на рисунках ба, бб, соответственно.

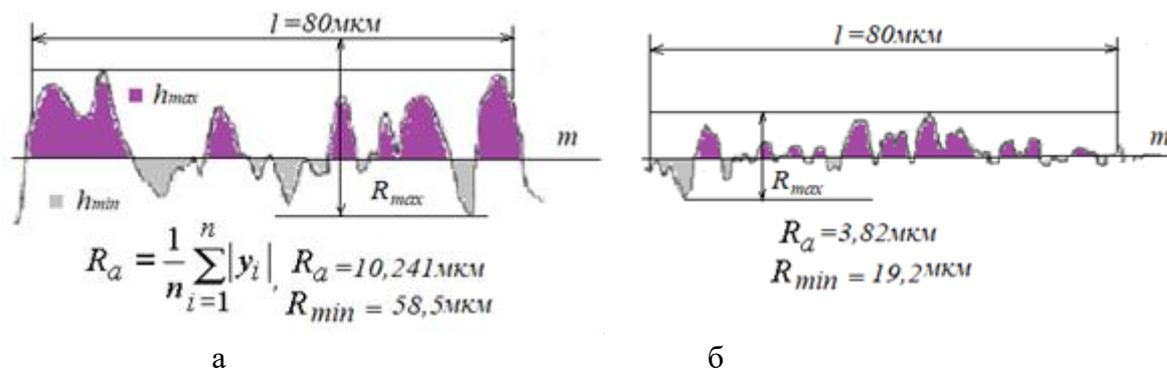


Рис. 6. Профилограммы поверхности стальных образцов, обработанных механическим методом - а и вакуумно-дуговым разрядом-б

Как следует из рис.7а, шероховатость поверхности образца фактически не зависит от давления, а также от величины тока разряда, что согласуется с линейной зависимостью числа КП от величины тока разряда.

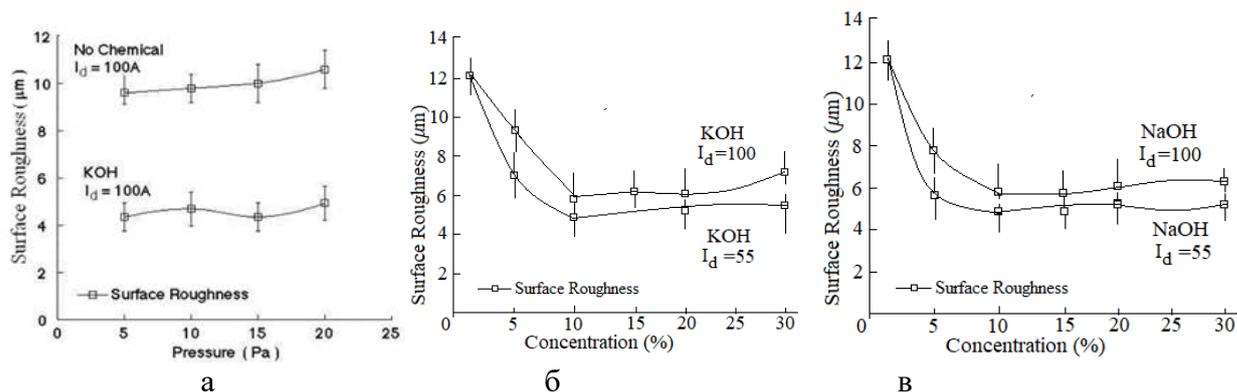


Рис.7. Зависимость шероховатости поверхности от тока разряда и концентраций нанесенного химического вещества: а) без добавки щелочей, б) с добавкой KOH, в) с добавкой NaOH.

Полученные экспериментальные данные показывают, что нанесение щелочей KOH и NaOH существенно влияет на характер воздействия КП на поверхность образца. Нанесение водных растворов KOH или смеси KOH с гидроксидом или нитратом щелочного или щелочно-земельного металла (например, $Ba(NO_2)_2 \cdot H_2O$) снижает работу выхода электрона с поверхности. Достаточно низкая теплота испарения ПАВ и низкий потенциал ионизации повышают интенсивность процессов ионизации в КП, при этом после воздействия катодных пятен существенно изменяется рельеф поверхности катода и, как следствие, снижается ее шероховатость.

Изучение характера изменения свойств приповерхностного слоя металлического катода в результате такого теплового воздействия катодной плазмы вакуумного дугового разряда на поверхность металлического изделия в области воздействия КП осуществлялось в экспериментальной вакуумной установке в электродной системе, обеспечивающей интеграционное воздействие КП металлического катода при реализации дугового разряда в стационарном режиме.

При реализации стационарного вакуумного дугового разряда осуществлялось воздействие КП на рабочую поверхность образцов, обеспечивающее обработку всей поверхности рабочего участка образца.

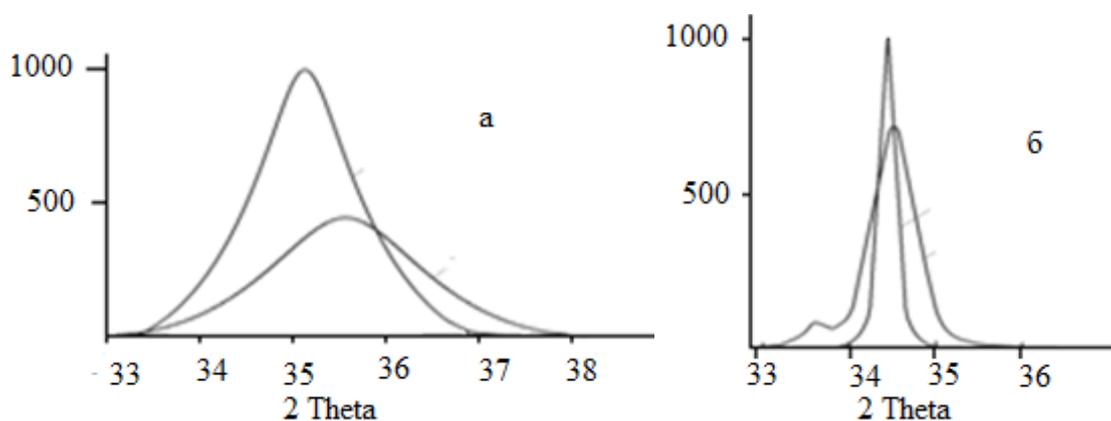


Рис.8. Дифрактограммы поверхности стального образца (ст.45), полученные с использованием хромового анода: а - исходной, б - очищенной.

На рис.8 представлены дифрактограммы поверхности исходного и очищенного изделия (сталь 45), полученные с использованием ДРОН-2.

Процентное содержание аустенита в обоих случаях незначительное. Так как при обработке поверхности дуговым разрядом толщина "белого слоя" невелика - от 2 мкм до 20 мкм (термин «белый слой» относится к твердым слоям материала, которые устойчивы к травлению и под микроскопом выглядят безликими и белыми), то наилучшую информацию о составе этого слоя позволяет получить более мягкое, менее проникающее излучение (хромовый анод). Поэтому γ - фаза более четко выражена на дифрактограмме, полученной с хромовым анодом. Подсчет содержания аустенита в этом случае показал, что его количество составляет ~8%.

Фазовые изменения, происходящие в поверхностном слое витого ленточного стального изделия (ст.65Г) в результате ее очистки, аналогичны фазовым изменениям в поверхностном слое стали 45, где также появляется небольшое количество аустенита.

Содержание аустенитной фазы изменяется в зависимости от режима обработки, скорости прохождения КП по обрабатываемой поверхности, а также природы загрязнений. Результаты определения энергетических затрат процесса сведены в табл.4.

Таблица 4.

Энергетические затраты при очистке стали дуговым разрядом.

Наименование прокатного изделия	Толщина окалины мкм.	Энергетические затраты кВт/час.
Лента г/к сталь 12 Х18Н10Т	2	0,67
Лента х/к сталь 30	1	0,5
Катанка, сталь 65Г	40	7,7
Катанка, сталь 65Г	2	0,47
Катанка, сталь 65Г	6	1,9
12Х18Н10Т	10	1,3
Катанка, сталь Р6М5	5	0,85
Катанка, сталь Р6М5		

Из табл. 4 видно, что энергетические затраты, при очистке образцов одной и той же марки стали, пропорциональны толщине окалины.

Установлено, что параметры вакуумно-дугового разряда при очистке поверхности, а также энергетические удельные затраты существенно влияют на класс шероховатости обработанной поверхности. На рис.10 представлена зависимость класса шероховатости поверхности образца-катода от удельного заряда.

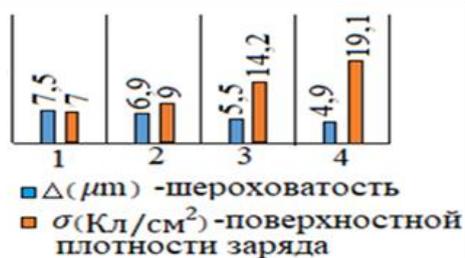


Рис.10. Зависимость класса шероховатости поверхности от поверхностной плотности заряда.

При низкой поверхностной плотности заряда 8-10 Кл/см² шероховатость поверхности изменяется практически незначительно и находится в пределах исходного класса шероховатости. При плотностях поверхностного плотности заряда 10-15 Кл/см² степень шероховатости увеличивается, и класс шероховатости снижается до 6 класса. При

поверхностных плотностях заряда более 18 Кл/см² класс шероховатости понижается более существенно. Таким образом, наблюдается зависимость между параметрами дугового разряда в процессе очистки и, как следствие, - поверхностными плотностями заряда на обработку поверхности.

Исследование влияния обработки вакуумно-дуговым разрядом на физико-механические свойства приповерхностного слоя проводилось на образцах стали 65Г. Для этого сравнивался их элементный состав, определенный методом Оже-электронной

спектроскопии, до и после обработки поверхности стального образца дуговым разрядом в вакууме. Поверхность образца предварительно подвергалась механической обработке. На рис.11 представлен энергетический спектр Оже-электронов при энергии первичных электронов $E_0 = 2,4$ кэВ, эмитированных стальным образцом, поверхность которого была предварительно шлифована.

Оже-спектрограммы шлифованной поверхности показали присутствие в энергетическом спектре пиков, соответствующих основным и примесным элементам Fe, Mn, C, Ni, Cr, Ti, Zn, P, S, а также Cl, K, Ca, O, Na, что свидетельствует о значительном ее загрязнении. Для изучения влияния температурного отжига образца на очистку его поверхности от примесных элементов, шлифованные стальные образцы нагревались до температуры 1500 К, в течение 30 мин при давлении остаточной среды 10^{-3} Па.

Из сравнения Оже-спектров на рис.11. и рис.12 видно, что при тепловой обработке образца происходит очистка его поверхности от таких элементов как P, Cl, S, K и Ca (интенсивность соответствующих им Оже-пиков, уменьшается) и обогащение такими элементами Fe, Mn, Cr, Ni и Ti.

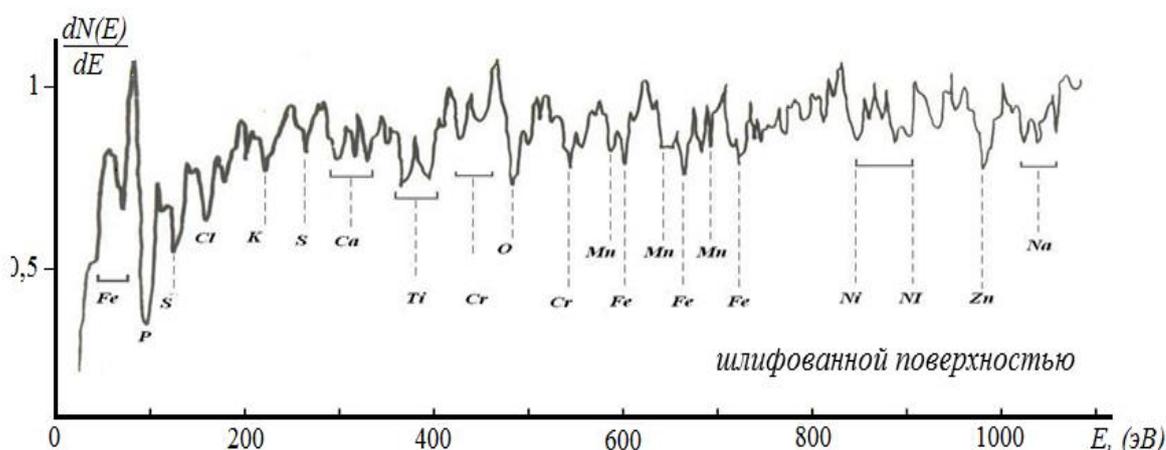


Рис.11. Энергетический спектр Оже-электронов для поверхности мишени стали 65Г с ошлифованной поверхностью.

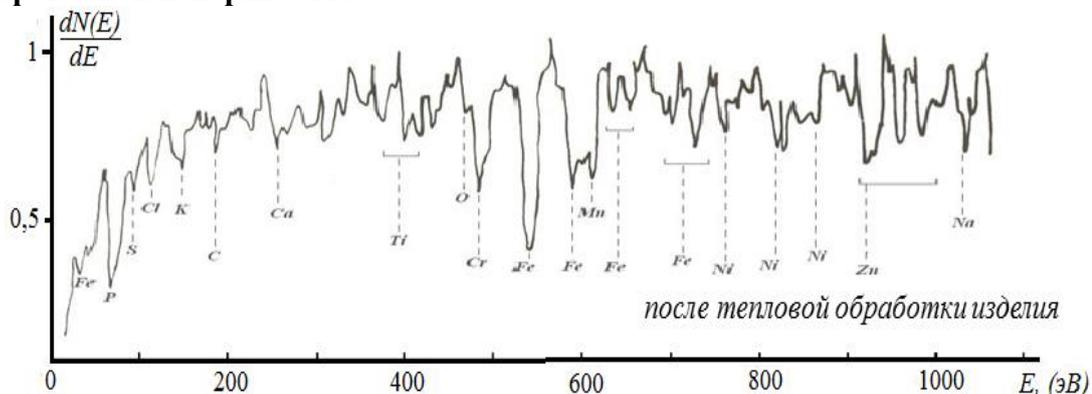


Рис.12. Энергетический спектр Оже-электронов для поверхности мишени стали 65Г после ее тепловой обработки.

Интенсивность Оже-пиков кислорода после тепловой обработки исследуемого образца-катода изменяется мало, что указывает на то, что концентрация кислорода на поверхности образца после тепловой обработки не изменяется. Следует отметить, что изучение влияния плазменной вакуумно-дуговой обработки на элементный состав поверхности образца осуществлялось на стальных образцах, прошедших предварительную механическую и термическую обработку.

При этом часть обработанных вакуумно-дуговым разрядом образцов впоследствии подвергалась дополнительной тепловой обработке в вакууме при температуре 1200К в течение 15 мин. На рис. 13 и рис. 14 представлены энергетические спектры Оже-электронов, эмитированных поверхностью после обработки стального образца дуговым

разрядом в вакууме в случаях без предварительной тепловой обработки и после нее, соответственно, при энергии первичных электронов $E_0=2,5$ кэВ.

Из сравнения этих Оже-спектров видно, что тепловой нагрев образца, обработанного электродуговым разрядом в вакууме, практически не влияет на вид регистрируемых Оже-спектров.

Сравнивая Оже-спектры одного и того же образца, не обработанного (рис.11 и рис. 12) и обработанного электродуговым разрядом в вакууме (рис. 13 и рис. 14), видно, что чистота поверхности образца из стали 65Г, подвергнутого воздействию вакуумного дугового разряда, значительно возрастает. Об этом свидетельствует уменьшение интенсивности Оже -пиков электронов, соответствующих элементам P, S, Cl, Ca, Са и другихи, наоборот рост интенсивности Оже-пиков для элементов Fe, Mn, Ni, Ti.

Рост интенсивности Оже-пика электронов углерода и его форма указывают на то, что углерод на поверхности стального образца находится в связанном состоянии в виде карбидов.

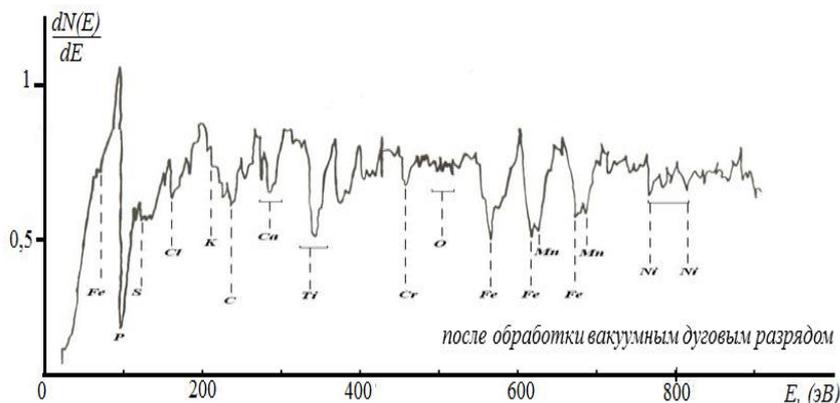


Рис. 13. Энергетически спектр Оже-электронов после обработки вакуумно-дуговым разрядом и при энергии первичных электронов $E_0=2,5$ кэВ.

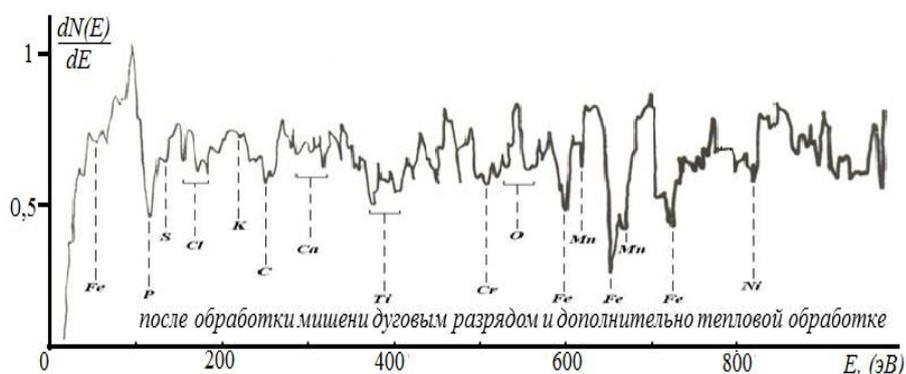


Рис.14. Энергетический спектр Оже-электронов после обработки мишени дуговым разрядом и дополнительной тепловой обработке при энергии первичных электронов $E_0=2,5$ кэВ.

Обнаруженная в спектрах тонкая структура Оже-пиков таких элементов как Fe, Mn, Cr, Ni, Ti, свидетельствует об их химической связи с другими элементами. При этом пики, соответствующие кислороду, в Оже-спектрах не обнаружены чем объясняется коррозионная стойкость поверхности и повышенная адгезионная покрытия. Таким образом обработка,очистка поверхности образцов стали ВДР приводит к формированию слоя измененной структурой толщиной до 10 мкм.

При этом микротвердость поверхности очищенных с помощью вакуумно-дугового разряда по сравнению с микротвердостью исходного образца, не обработанного разрядом, возрастает на 20-30%. Повышение микротвердости обработанной поверхности происходит прежде всего за счет наследования от мартенсита дефектной структуры, увеличения плотности дефектов, а также развития рекристаллизации. Кроме того, высокая скорость роста температуры поверхности в зоне воздействия катодного пятна вакуумной дуги

приводит к смещению основных фазовых превращений в область высоких температур и создает особые условия для процесса диффузионного насыщения поверхностных слоев. А совмещение этого процесса с зарождением аустенита в поверхностном слое образцов приводит к повышению микротвердости их приповерхностного слоя.

Рассмотренный нами комплекс процессов в приповерхностном слое вблизи поверхности в зоне воздействия катодного пятна вакуумной дуги стальных образцов приводит к повышению их микротвердости, способствует формированию антикоррозионных свойств и повышению адгезии.

Для изучения комплексного воздействия вакуумной дуги на внутреннюю поверхность образца трубы осуществлено нанесение покрытия на неё в вакуумированном внутреннем пространстве при давлении остаточной среды 10^{-1} - 10^{-2} Па.

Эксперименты проводились в вакууме при давлении остаточной среды 10^{-1} - 10^{-2} Па. Было нанесено покрытие толщиной 40–80 мкм сплава Cr-Ni-Si на внутреннюю поверхность стальных труб P91 с длиной 120 мм. В результате серии импульсов вакуумного дугового разряда. Плотность тока вакуумного дугового импульсного разряда на аноде варьировалась в пределах от 4.0 А/см² до 6.1 А/см². Ток разряда составлял 450–650 А. Продолжительность импульсов изменялась от 2 до 10 сек. Интервалы между импульсами были 60–120 сек. Для обработки и нанесения покрытия на внутреннюю поверхность образца реализована методика управления катодных пятен магнитным полем вакуумного дугового разряда по поверхности катода в коаксиальной электродной системе и нанесения покрытия на внутреннюю поверхность в конструкции вакуумно-дугового устройства с протяженным цилиндрическим катодом.

Покрытие было нанесено на внутреннюю поверхность трубы из мартенситной стали X 10CrMoVNb9-1 (1.4903) диаметром 38,0 мм. Толщина стенки составляла 5.0 мм, длина образца трубы 595 мм. Цилиндрический катод был изготовлен из аустенитной стали X15CrNiSi25-20 и размещен соосно изделию, то есть коаксиально, и являлся источником наносимого материала на внутреннюю поверхность трубы.

В табл. 5 представлен химический состав материала катода и нанесенного покрытия. Полученные покрытия толщиной 20–50 мкм имеют химический состав почти такой же, как исходный материал катода и с высоким содержанием хрома.

Таблица 5

Химический состав материала катода и нанесенного покрытия.

Материал	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Sn	Al
труба X10CrMoVNb.9.1	0,1	0,31	0,44	0,016	0.002	8,41	0,9 4	0,12	0,006	0,012
Источник X15CrNiSi25-20	0,0 45	1,64	1,83	0,024	0.001	24,2	0,1 8	19,7 0		
Покрытия	0,0 5	1,6	1,7		0.001	25,3	0,1 9	19,2		

Изучение образцов протяженного цилиндрического катода трубы диаметром 38 мм и высотой 600 мм., подвергнутых воздействию КП вакуумной дуги с нанесенным покрытием на внутреннюю поверхность трубы показало, что нанесенные покрытия имели необходимую сплошность, а неравномерность покрытия не превышала 2–3 процентов.

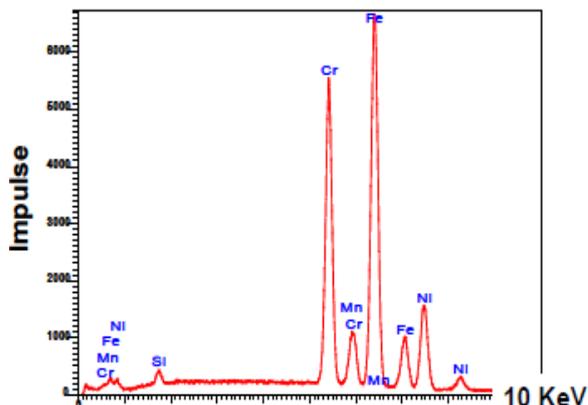


Рис 15 Дифрактограмма состава нанесенного покрытия

На рис.15 представлен химический состав нанесенного покрытия (EDX характеристика), на внутреннюю поверхность образца вакуумным дуговым разрядом в условиях КП с помощью системы. Полученные EDX характеристики, представленные на рис.15, показывают, что химический состав нанесенного покрытия соответствует материалу катода и не изменяется существенно за время технологического процесса нанесения покрытия вакуумно-дуговым разрядом. Высокое содержание хрома в покрытиях является очень существенным для придания им защитных свойств против окисления.

Таким образом, результаты, полученные в главе 4 показывают, что:

- нанесение покрытия гидроксидов калия и натрия (с концентрациями до 25%) на обрабатываемую стальную поверхность при вакуумно-дуговой обработке поверхности катода приводит к снижению шероховатости поверхности в 1.5–3.2 раз, а также к уменьшению энергозатрат на очистку поверхности от поверхностных наслоений (в т.ч.окалины) в 1.5–2.4 раза;
- установлена и реализована методика управления катодных пятен магнитным полем вакуумного дугового разряда по поверхности катода в коаксиальной электродной системе и нанесения покрытия на внутреннюю поверхность в конструкции вакуумно-дугового устройства с протяженным цилиндрическим катодом, и показано, что покрытия имеют необходимую сплошность, а их химический состав соответствует материалу катода, а высокое содержание хрома в покрытиях является существенным для их защитных свойств против окисления;
- получено распределение легирующих элементов (C, Mn, Cr, Si) в приповерхностном слое цилиндрического стального образца (сталь 65Г), формирующееся в результате стационарного воздействия катодных пятен вакуумной дуги при очистке поверхности вакуумным дуговым разрядом.
- определены условия формирования эффективного ионно-плазменного воздействия катодными пятнами вакуумного дугового разряда на внутреннюю поверхность металлического трубчатого изделия, в том числе последовательного воздействия двумя различно формируемыми вакуумными дуговыми разрядами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Впервые установлено, что на расстоянии 200 нм от катода вакуумно-дугового разряда создается слой ионов, формирующий электрическое поле напряженностью до 5×10^7 В/см, потери на излучение и рассеяние ионов при плотности электронного тока $\sim 10^6$ А/см² невелики; вероятность ионизации ($P \leq 1$) атомов близка к единице вплоть до концентраций $7,5 \times 10^{19}$ см⁻³;
2. Показано, что при соответствующих потоках заряженных частиц результат перезарядки частиц в потоке плазмы подобен осаждению ионов на поверхности пористого диэлектрика толщиной λ_i , при котором создаются электрические поля с напряженностью $\sim 10^7$ В/см и более.
3. Впервые получено, что нанесение на рабочую поверхность катода гидроксидов калия и натрия (с концентрациями до 25%) приводит к уменьшению шероховатости поверхности при вакуумно-дуговом воздействии на поверхность катода, с кратным уменьшением

величин шероховатости поверхности основы катода, что, в свою очередь, приводит к облегчению процесса ионизации;

4. Показано, что воздействие катодных пятен вакуумного дугового разряда приводит к фазовым и структурным изменениям приповерхностного слоя катода, и установлено, что именно локализованное КП приводит к формированию «белого слоя» (появление аустенита и альфа-феррита на железном катоде);

5. Впервые определено формирование в приповерхностном слое образца катода трехзонной структуры распределения температуры, в области воздействия катодного пятна, а также наличие зоны с максимальной температурой

6. Разработана оригинальная экспериментальная установка с магнитной системой управления вакуумным дуговым разрядом для нанесения покрытий на внутренние поверхности изделий, с механической подачей изделия; полученные покрытия имели необходимую сплошность, причем химический состав нанесенного покрытия соответствовал материалу катода и не изменялся существенно за время технологического процесса, а неравномерность покрытия не превышала 2-3 процентов;

KHUDOYKULOV ILYOS KHOLMURADOVICH

**PROCESSES IN THE CATHODE SPOT OF A VACUUM-ARC
DISCHARGE UNDER CONDITIONS OF AUTO-AND THERMIONIC
EMISSION**

01.04.04 – Physical electronics

**ABSTRACT OF DISSERTATION OF THE DOCTOR OF
PHILOSOPHY (PhD) ON PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

TASHKENT – 2023

The subject of PhD dissertation is registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of Republic of Uzbekistan under number B2017.3.PhD/FM117

Dissertation has been prepared at the Institute of Ion-plasma and laser technologies.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) has been posted on the website of the Scientific Council (www.iplt.uz) and on Information-educational portal «ZiyoNet» (<http://www.ziynet.uz>).

Scientific supervisor: **Ashurov Khatam Bakhronovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

Official opponents: **Maksimov Sergey Evlantievich**
Doctor of Physics and Mathematics Sciences

Kamardin Alexey Ivanovich
Candidate of Physics and Mathematics Sciences

Leading organization: **Tashkent Technical State University**

The defense will take place on «27» 06 2023 at 14³⁰ at the meeting of the Scientific Council number DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 at Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent, 33 Durmon yuli street. Phone/fax: (+99871) 262-32-54, e-mail: info@iplt.uz).

The PhD dissertation is can be looked through in the Information-Resource Centre of the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (is registered № 5) (Address: 100125, 33, Durmon yuli str., Tashkent, Uzbekistan. Phone: (+99871) 262-31-69).

The abstract of the dissertation is sent out on «16» 06 2023.

(Mailing report № 5 on «16» 06 2023).



Kh. B. Ashurov

Chairman of scientific council on award of scientific degrees, doctor of technical science, professor

I.D. Yadgarov

Scientific secretary of scientific council on award of scientific degrees, doctor physical and mathematical science, senior researcher

B.E. Umirzakov

Chairman of scientific seminar under scientific council on award of scientific degrees, doctor of physical and mathematical science, professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The purpose of the study. consists in the development, substantiation and formation of model ideas about the processes occurring in a vacuum arc, plasma and cathode spots on the surface of a metal serving as a cathode, for further implementation in vacuum arc technologies.

The objectives of the research:

the study of the processes and structure of the charge system of particles in the cathode spot of a vacuum arc discharge by the theoretical calculation method;

creation of a model of the charge system of particles of the cathode spot, in the area of the cathode potential drop, taking into account the ionic and electronic components of this system;

study of the influence of the process of ion recharging in the space charge region on the generation of high-energy ions in the electric field formed by this charge;

determination of the influence of the presence of surfactants on the cathode surface on the characteristics of the effect of the cathode spot plasma on the cathode surface, as well as energy consumption and the roughness of the cathode surface;

study by theoretical computational study of the parameters of non-stationary temperature fields, in the near-surface layer of the cathode created by thermal, ion-plasma effects of cathode spots, its effect on the properties, structure of the near-surface layers treated with cathode spots of a vacuum arc discharge;

determination of the conditions for ensuring effective ion-plasma impact of vacuum arc discharge cathode spots on the inner surface of a metal tubular product, including sequential exposure to two differently formed vacuum arc discharges.

The objects of research work. Are the vacuum arc discharge, its cathode spots acting on the cathode surface.

The scientific novelty of the research is as follows:

a mathematical model of non-linear non-stationary ionization processes in the area of cathode potential drop in the cathode spot of a vacuum arc discharge on a "cold" cathode has been developed. It has been determined that the charge system acquires energy due to the acceleration of emitted electrons by the cathode spot (CS) potential and spends it mainly on ion acceleration and heating of the electron gas;

it was found for the first time that at a distance of 200 nm from the cathode of a vacuum-arc discharge, a layer of ions is created, which forms an electric field with a strength of up to $5 \cdot 10^7$ V / cm, the losses for radiation and scattering of ions at an electron current density of $\sim 10^6$ A / cm² are small, the probability of ionization of atoms close to unity up to concentrations of $7.5 \cdot 10^{19}$ cm⁻³, a (at high concentrations, the ionization probability decreases as a result of ion recharging);

it is determined that the thermal effect of the vacuum arc cathode spot leads to the formation of a special "white layer", with a thickness of 2 microns to 20 microns, which is based on the "stratification" of the near-surface area into zones with phase (appearance of austenite), structural (microstresses of the second kind) formations with grinding of mosaic blocks to 0.1-0.2 microns ;

it was found for the first time that the coating of potassium and sodium hydroxides (with concentrations up to 25%) on a treated steel surface during vacuum-arc treatment of the cathode surface leads to a decrease in surface roughness by a factor of 1.5–3.2, as well as to a decrease in energy consumption for cleaning the surface from surface layers (including scales) by 1.5–2.4 times;

for the first time established, proposed and implemented original methods of magnetic scanning of cathode spots of a vacuum arc discharge over the cathode surface in a coaxial electrode system and coating the inner surface in the design of a vacuum-arc device with an extended cylindrical cathode, and it is shown that the coatings have the necessary continuity, and their the chemical composition matches the cathode material, and the high chromium content of the coatings is essential for their protective properties against oxidation.

The distribution of alloying elements (C, Mn, Cr, Si) in the near-surface layer of a cylindrical steel sample (steel 65G) was obtained, which is formed as a result of the stationary action of cathode spots of a vacuum arc during surface cleaning by a vacuum arc discharge.

Implementation of the research results. Based on the results of research on optimizing the process of vacuum arc exposure to the inner surface of tubular products by cathode spots, a patent of the Republic of Uzbekistan was obtained for a method for processing the inner surface of a metal pipe IAP 05070, Bulletin 8 (172), 2015, where the results of complex analytical and experimental studies of the effects of cathode spots were used. vacuum arc on the surface of steel products of various geometry, including tubular ones. This problem was successfully solved thanks to the developed method of forming a closed coaxial space of the electrode system for implementing the process of vacuum arc discharge exposure to cathode spots on the inner surface of a vertically located tubular product, which is an element of a system that forms an evacuated working space and an electric discharge process.

Obtained patent of the Republic of Uzbekistan, IAP 05778, 3(215), 2019 on the method of vacuum-arc treatment of the inner surface of pipes used in analytical and experimental studies of the complex effect of vacuum arc cathode spots on the surface of steel tubular products.

This task of expanding the functionality of the technological impact of a vacuum arc discharge on the surface of metal products in order to impart the necessary functional properties, improve the efficiency and quality of the processing process, was successfully solved thanks to the technique that forms the complex processing of the inner surface of a metal pipe by two simultaneously functioning vacuum arc discharges.

Structure and volume of dissertation. The structure of the thesis consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references and applications. The volume of the dissertation contains 115 pages of text, including 39 figures and 8 tables.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (часть I; part I)

- A1. В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашууров, Х.Х. Кадыров, Б.Р. Кахрамонов. «Параметры «белого слоя» формируемого при вакуумно- дуговой обработке стальной поверхности катодными пятнами» Физика и химия обработки материалов, 2016, №6, с. 64-69.
- A2. V.N. Arustamov, K.B. Ashurov, Kh.Kh. Kadirov, I. Kh. Khudaykulov «Effect of the Cathode Spots of a Vacuum Arc on the Properties of the Surface Layer of Structural Materials». Journal of Surface Investigation. X ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2014, Vol. 8, No. 3, pp. 63–71, <https://doi.org/10.1134/S1027451014030227>, [Scopus: IF = 0.594].
- A3. В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашууров, И.Х. Худойкулов «Исследование процессов ионизации в катодном пятне вакуумной дуги» Таш ГТУ, Ташкент, Республика Узбекистан, 2017 г, сс. 50-56, [05.00.00, №16].
- A4. В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашууров, А.М. Миркаримов, С.Л. Пожаров, Х.Х. Кадыров, И.Х. Худайкулов. «Особенности процессов в катодном пятне вакуумной дуги при наличии на поверхности катода соединений щелочных металлов». Физика и химия обработки материалов, 2014г., Россия, № 2. сс. 22-26.
- A5. В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашууров, И.Х. Худайкулов. Ионизационные процессы в катодном пятне вакуумной дуги. Доклад Академия наук Ташкент, Узбекистан, 2021г, сс. 19-25. [01.00.00, № 7].
- A6. В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашууров, Х.Х. Кадыров, И.Х. Худайкулов. «Плазменное технологическое воздействие вакуумного дугового разряда на поверхность конструкционных материалов в присутствии поверхностно-активных веществ». Узбекский Физический журнал № 3-4, 2013г, сс. 212-218, [01.00.00, № 5].
- A7. И.Х.Худайкулов, В.Н.Арустамов, У.Ф.Бердиев, Х.Б.Ашууров. «Исследование нестационарных температурных полей, формируемых в катоде в зоне воздействия катодного пятна вакуумной дуги». Доклады Академия наук Ташкент, Узбекистан, №5, 2022г, сс. 35-40, [01.00.00, № 7].
- A8. В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашууров, И.Х. Худайкулов. «Технологическое воздействие вакуумного дугового разряда на внутреннюю поверхность металлических труб». Узбекский Физический журнал № 5, 2016г, [01.00.00, № 5].
- A9. Х.Б. Ашууров, В.Н. Арустамов, Х.Х. Кадилов, В.П. Харьяков, И.Х. Худайкулов. «Способ обработки внутренней поверхности металлической трубы». Агентство по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан, Патент IAP 05070, 2015г.
- A10. Х.Б. Ашууров, В.Н. Арустамов, Х.Х. Кадилов, В.П. Харьяков, И.Х. Худайкулов. «Способ вакуумно- дуговой обработки внутренней поверхности трубы». Агентство по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан, Патент IAP 05778, 2019г

II бўлим (часть II; part II)

- A11. В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашууров, И.Х. Худойкулов, Б.Р.Кахрамонов, Харьяков В.П.К вопросу иницирования вакуумного дугового разряда VII международная конференция «лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2021, 23-26 март, Россия. сс.223-224.
- A12. В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашууров, И.Х. Худойкулов. Особенности плазменной вакуумно-дуговой обработки стальной поверхности VII международная конференция «лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2021, 23-26 март, Россия. сс. 225-226.
- A13. В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашууров, И.Х. Худойкулов К вопросу механизмов F-t эмиссии электронов в катодном пятне вакуумной дуги» VII международная конференция «лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2021, 23-26 март, Россия. сс.282-283.
- A14. В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашууров, И.Х. Худойкулов, Б.Р.Кахрамонов, А.М.Журавлев.О процессах ионизации и перезарядки ионов в катодном пятне дугового разряда в вакууме. XXV Международная конференция Взаимодействие ионов с поверхностью «ВИП-2021» 23-27 август, Россия, сс.61-67.

- A15. В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашуров, И.Х. Худойкулов. Анализ условий формирования анодного пятна вакуумной дуги и реакция анодного падения потенциала на инъекцию плазмы». XXV Международная конференция Взаимодействие ионов с поверхностью «ВИП-2021». 23-27 август, Россия, сс.68-70.
- A16. В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашуров, И.Х. Худойкулов, Б.Р.Кахрамонов, А.М. Журавлев. Вакуумно-дуговая обработка поверхности конструкционных материалов. XXV Международная конференция Взаимодействие ионов с поверхностью «ВИП-2021» 23-27 август, Россия, сс.71-74.
- A17. В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашуров, И.Х. Худойкулов. Ионизационные процессы в катодном пятне вакуумной дуги. VII международная конференция «лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2021, 23-26 март, Россия. сс.284-285.
- A18. В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашуров, И.Х. Худойкулов, Б.Р.Кахрамонов. Комплексный процесс очистки поверхности изделия ионами плазмы тлеющего разряда и плазменного вакуумно-дугового осаждения покрытий. Международная конференция IPES-8, Ташкент, Узбекистан. 23-24 сентября 2021 г. сс.95-96.
- A19. В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашуров, И.Х. Худойкулов, Б.Р. Кахрамонов. Особенности плазменной вакуумно- дуговой обработки стальной поверхности VI международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2020» с.232-233
- A20. В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашуров, И.Х. Худойкулов, Б.Р. Кахрамонов. К вопросу нанесения покрытий из плазмы вакуумного разряда VI Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2020» с.236-237.
- A21. В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашуров, И.Х. Худойкулов. Влияние температуры катода на трансформацию ионно-плазменных процессов катодной области вакуумной дуги. VI Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2020 с.240-241.