

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

ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ

АРУСТАМОВ ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ

**ВАКУУМ-ЁЙ РАЗРЯДИ КАТОД ДОҒЛАРИДАГИ ФИЗИК
ЖАРАЁНЛАР ВА МЕТАЛЛ СИРТИГА ТАЪСИРЛАШНИНГ ВАКУУМ
ЁЙИ УСУЛЛАРИ**

01.04.04 – Физик электроника

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc) ДИССЕРТАЦИЯСИ
АВТОРЕФЕРАТИ**

ТОШКЕНТ – 2025

**Физика-математика фанлари бўйича фан доктори (DSc)
диссертацияси автореферати мундарижаси
Оглавление автореферата диссертации доктора (DSc)
физико-математических наук
Contents of dissertation abstract of doctor (DSc)
physical-mathematical sciences**

Арустамов Владимир Николаевич

Вакуум-ёй разряди катод доғларидаги физик жараёнлар ва металл сиртига таъсирлашнинг вакуум ёйли усуллар..... 3

Арустамов Владимир Николаевич

Физические процессы в катодном пятне вакуумного дугового разряда и вакуумно- дуговые методы воздействия на металлическую поверхность... 31

Arustamov Viladimir Nikolayevich

Physical processes in the cathode spot of a vacuum arc discharge and vacuum arc methods of treating metallic surfaces..... 61

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works 65

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

ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ

АРУСТАМОВ ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ

**ВАКУУМ-ЁЙ РАЗРЯДИ КАТОД ДОҒЛАРИДАГИ ФИЗИК
ЖАРАЁНЛАР ВА МЕТАЛЛ СИРТИГА ТАЪСИРЛАШНИНГ ВАКУУМ
ЁЙЛИ УСУЛЛАРИ**

01.04.04 – Физик электроника

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc) ДИССЕРТАЦИЯСИ
АВТОРЕФЕРАТИ**

ТОШКЕНТ – 2025

Физика-математика фанлари буйича фан доктори (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Олий таълим, фан ва инновациялар вазирлиги ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2024.1.DSc/FM260. рақам билан рўйхатга олинган.

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

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

Илмий маслаҳатчи:

Ашуров Хатам Бахронович
техника фанлари доктори, профессор

Расмий оponentлар:

Кремков Михаил Витальевич
физика-математика фанлари доктори, профессор

Максимов Сергей Евлантиевич
физика-математика фанлари доктори, к.и.х.

Ташатов Алланазар Қаршиевич
физика-математика фанлари доктори, профессор

Етакчи ташкилот

**Ислом Каримов номидаги Тошкент Давлат
Техника Университети**

Диссертация ҳимояси Ион-плазма ва лазер технологиялари институти ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 рақамли илмий кенгашнинг 2025 йил «7» октябр соат 14:30 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 (13 рақами билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 33-уй. Тел: (99871) 262-31-69.)

Диссертация автореферати 2025 йил «24» сентябр куни тарқатилди.
(2025 йил «24» сентябрдаги 13 рақамли реестр баённомаси)



Х.Б. Ашуров

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш раиси, техника фанлари доктори, профессор.

И.Д. Ядгаров

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш илмий котиби, физика-математика фанлари доктори, профессор.

У.К. Махманов

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси, физика-математика фанлари доктори, профессор.

КИРИШ (фан доктори (DSc) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг дозарблиги ва зарурлиги. Сўнгги вақтларда дунё иқтисодийнинг инновацион йўналишда ривожлантириш, тармоқларини барқарор ўсишини таъминлаш энергия ва ресурс тежаш, қайта тикланувчи ҳамда функционал параметрлари бўйича юқори сифатли қопламалар ва юпқа қатламларни олиш, электрофизик қурилмалар ва асбоб-ускуналарни, шунингдек микроэлектроника, яримўтказгич, вакуум, электрон, радиация, ядровий ва космик техника учун кўп компонентли қопламалар ва структураларни ҳосил қилиш технологияларини ишлаб чиқиш заруриятини тақозо этмоқда. Ишлаб чиқариш маҳсулотларининг ишчи юзасини мустаҳкамлик, ҳимоявий, занглашга чидамли ва бошқа эксплуатация хусусиятларини оширадиган замонавий технологияларни ишлаб чиқиш ва жорий этиш, ҳамда нанокөмпозит материалларни яратиш бугунги замонавий фан ва техника олдида турган муҳим ва долзарб вазифалардан ҳисобланади.

Дунёда ушбу вазифаларни ҳал этишда энг истиқболли вакуумли, ион-плазмали физик чўктириш усуллари (PVD), асосан вакуум ёй разряди (ВЁР) асосидаги технологиялар ҳал қилувчи аҳамият касб этади. Буларнинг барчаси (ВЁР)нинг физик ва технологик асосларини қайта кўриб чиқиш, металл юзасининг хусусиятларини ўзгартириш, қопламалар ётқизиш, нанотузилмалли материаллар синтези ва олиш технологияларини ривожлантириш бўйича янги ёндашувларни ишлаб чиқишга олиб келди.

Ушбу диссертация тадқиқоти Ўзбекистон Республикасида фан ва технологияларни ривожлантиришнинг устувор йўналишларидан бири бўлган ППИ-3 «Энергетика, энергия ва ресурс тежаш, транспорт, машинасозлик ва асбобсозлик» мавзусига мувофиқ амалга оширилган бўлиб, у тўғридан-тўғри буюмларнинг хизмат муддатини узайтириш, уларнинг юзасига юқори функционал хусусиятлар бериш ҳамда янги материалларни олишга қаратилган вазифаларни амалга ошириш билан боғлиқдир.

Тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикасида илм-фан ва технологиялар ривожланишининг устувор йўналишларига мувофиқлиги

Ушбу диссертация тадқиқоти Ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада энергия ва ресурс тежашни ошириш билан боғлиқ қарорлар ва бошқа норматив-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга хизмат қилади ҳамда Ўзбекистон Республикаси Президентининг қуйидаги фармонларида назарда тутилган вазифалар билан бевосита боғлиқдир. №ПФ-4947 2017 йил 7 февралда қабул қилинган «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармон, №ПФ-2789 2017 йил 17 февралда қабул қилинган «Фанлар академияси фаолиятини янада такомиллаштириш, илмий-тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Фармон, №ПФ-4422 2019 йил 22 августда қабул қилинган «Хўжалик ва махсус соҳаларда энергия самарадорлигини ошириш, энергия тежовчи технологияларни жорий этиш ҳамда қайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантириш бўйича тезкор

чора-тадбирлар тўғрисида»ги Фармон, шунингдек №ПФ-60 2022 йил 28 январда қабул қилинган «2022–2026 йилларда Янги Ўзбекистонни ривожлантириш стратегияси тўғрисида» ги Фармон.

Хорижий илмий тадқиқотларнинг диссертация мавзуси бўйича шарҳи. Диссертация мавзусига оид вакуум ёй разрядининг физик асослари, ион- плазмали ва ёй-разряди технологиялар бўйича тадқиқотлар сўнгги ўн йилликлар давомида университетлар ва илмий муассасаларда, жумладан, Лоренс Беркли миллий лабораторияси (Калифорния, АҚШ), General Electric тадқиқот лабораторияси, Калифорния университети физика бўлими (Лос-Анджелес, АҚШ), Тель-Авив университети электр муҳандислиги мактаби (Исроил), Физика-техника институти (Харьков, Украина), ИСЭ СО РАН, Юқори ҳароратлар бирлашган институти РАН, Ядро физикаси институти СО РАН ва бошқа дунё илмий марказларида интенсив равишда олиб борилмоқда ва ҳозирги кунга қадар давом этмоқда. 1990 йилда Миллер томонидан тузилган вакуумли разрядлар бўйича библиография 4250 та номзодни ўз ичига олади, лекин ёй разрядининг табиати ҳозирги кунга қадар энг кам тушунилган мавзулардан бири бўлиб қолмоқда. Ушбу муаммони ҳал қилиш устида кўплаб таниқли олимлар ишлаган: Комптон, Вуд, Штарк, Холл, Лэнгмюр, Фаулер, Милликен, Дайк, Оппенгеймер, Штенбек, Ромпе ва бошқалар. 1930-йилларда Комптон вакуумли ёйи аниқлаб берган – бу катоддаги потенциал пасайиши жуда паст бўлган разряд бўлиб, у катода металл атомларининг ионизация потенциали билан таққосланади. Муҳим экспериментал натижалар ИСЭ СО РАН ва ИЭФ УрО РАН олимлари, шунингдек, Даалдер (Голландия), Кимблин (АҚШ), Ютнер (ФРГ), Кесаев (СССР), Танберг (АҚШ) томонидан олинган. Улар келтирган хулосалар шундан иборатки, катод нуқтасининг бутун физикаси бир хужайрада амалга оширилади ва бир циклда яқунланади. Бу хужайрадан ионлар 10^6 см/сек тезликда анод томон учиб чиқади. Вакуум-ёйи разряддаги физик жараёнлар тўғрисида олинган натижалар турли хил вакуумли, разрядли ва плазмали қурилмалар ва технологияларни яратиш учун асос бўлди. Ҳозирги кунда ушбу йўналишдаги фаол тадқиқотлар нанозаррачалар синтези, наноструктурали материаллар (вольфрам карбиди ва бошқалар) олишда технологик қўлланишларни ривожлантиришга қаратилган. Бугунги кунга қадар ушбу соҳадаги бир қатор долзарб вазифалар ҳал қилинди, хусусан, вакуумли ёйи назариясининг замонавий ҳолати Г. Эккер томонидан ўрганилди. Катод ҳодисалари Л. Харрис томонидан тадқиқ қилинди. Бироқ, уларнинг натижаларини баҳолашда қарама-қаршиликлар мавжуд. Масалан, Дж. Фаррелл, Г. Эккер ва Л. Харрис ишларида катод нуқтасидаги ток зичлиги тадқиқ қилинган. РАН академиги Г.А. Месяц Томск политехника университетида ИСЭ СО РАН ва ИЭФ УрО РАН ходимлари билан биргаликда катод нуқтасидаги портлаш эмиссияси – бу суяқ металл оқимларининг портлашлари билан шартланган қисман жараён эканини тахмин қилди, бу эса электронлар эмиссиясининг улкан тоқларини тушунтиради. Натижалар И.Г. Кесаев, Г.А. Месяц, М.А. Яландин, В.М. Куляпин, А.Н. Серьезнов, М.Ф. Жуков, А.С. Коротеев ва бошқалар томонидан олинган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Вакуум ёйи разряднинг ўзига хос катод боғламлари – катод нуқталарида содир бўладиган жараёнларни, шунингдек, уларнинг катод металл юзасига таъсир хусусиятларини ўрганиш катод нуқталаридаги жараёнлар ҳақидаги назарий тасаввурларни ривожлантириш, вакуумли ёйи разряднинг материал юзасига таъсири, янги наноматериалларни ишлов бериш ва олиш технологияларини яратиш ва ривожлантириш учун жуда муҳимдир. Вакуум ёй разряди физикасининг марказий масалаларидан бири бу электронлар эмиссияси механизми бўлиб, у билан ушбу разряднинг турли техник қўлланишлари, зарралар манбаи, плазмали оқимлар, ҳамда металл юзасини ишлов бериш, қопламалар қўйиш ва янги материаллар олиш жараёнлари яқиндан боғланган. Асосий эътибор “совуқ катод” даги катод микропятналари билан вакуумли ёйи разрядни тадқиқ қилишга қаратилган бўлиб, бу физик электроника тадқиқотларининг йўналишларидан биридир. Уларнинг катод юзасига таъсир зонасида ҳарорат юқори қийматларга етади, эрозион плазмали оқимлар шаклланади, улар электродлараро бўшлиққа учиб чиқади ва разрядни амалга оширишда ҳамда унинг амалий қўлланишида асосий рол ўйнайди. Ҳозирги кунда катод нуқталарида ёниш жараёнида содир бўладиган элементар жараёнлар электрод юзасидаги микроскопик нотўғрилиқдаги портлаш эмиссияси акти эканлиги ҳақидаги нуқтаи назари устунлик қилмоқда. Шунинг учун катод нуқталари хусусиятлари, катод материаллари ва унинг юза ҳолати ўртасида тўғридан-тўғри боғлиқлик мавжуд деб тахмин қилиш мумкин. Шу билан бирга, катод нуқтасида плазмали тузилмалар генерациясини белгилайдиган вакуумли ёйи разряд жараёнларини, плазманинг катод юзасига таъсирини, яъни электронлар эмиссияси шартларини, юзага яқин қатлам хусусиятларини шакллантириш жараёнини бошқаришни, янги материалларни шакллантириш ва синтез қилиш жараёнларини ўрганишга эътибор қаратилмаган.

Ўзбекистонда вакуум ёй разрядининг катод доғидаги жараёнларни, уларнинг металл юзасига таъсирини ўрганиш Ўзбекистон Республикаси Фанлар академиясининг У.А. Арифов номидаги Ион-плазмали ва лазер технологиялари институтида (собиқ Электроника институти) ўтган асрнинг ўртасидан бошлаб олиб борилган. Олиб борилган ишлар вакуум ёй разрядининг фундаментал асосларини, вакуум ёй разряди плазмасининг металл юзаси билан ўзаро таъсирини ўрганишга, амалий вазифаларни ҳал қилишга қаратилган эди. Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Электроника институтида 1970-1990-йилларда (У.А. Арифов, М.Х. Эстерлис, Р.Б. Нагайбеков) вакуум ёй разрядининг катод доғи хусусиятларини, вакуум ёй разрядининг катод металл юзасига таъсир хусусиятларини ўрганиш, турли геометрияли маҳсулотларга ишлов бериш, тозалаш ва қоплама қўйиш усулларини ишлаб чиқиш бўйича тадқиқотлар ривожлантирилди. Кейинчалик бу тадқиқотлар Х.Б. Ашуров, С.Л. Пожаров, В.Е. Булат, А.М. Миркаримов ва бошқалар томонидан давом эттирилди. Ҳозирги кунда эътибор марказида вакуум ёйи катод доғидаги генерация жараёнлари, катод плазмасининг ишлов берилаётган юзанинг юза қатламига таъсир хусусияти, металл маҳсулотларни

бир технологик циклда ишлов бериш усуллари ва технологияларини ишлаб чиқиш, шунингдек, янги материалларни олиш ва синтез қилиш масалалари турибди.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режаси билан боғлиқлиги.

Диссертация иши Ўзбекистон Республикаси Фанлар академиясининг У.А. Арифов номидаги Ион-плазмали ва лазер технологиялари институтининг илмий-тадқиқот ишлари режасига мувофиқ амалга оширилди. Ушбу иш қуйидаги лойихалар доирасида бажарилди: ФА-А15-Ф129, 2010-2011 йиллар, «Диаметри 500 мм гача бўлган қувурларнинг ички юзасига кўп функцияли ҳимоя қопламаларини вакуум ёй усули билан қоплама қоплаш технологиясини ишлаб чиқиш»; АЗ-ФА-Ф173, 2012-2014 йиллар, «Махсулотлар юзасини ишлов бериш ва уларга ҳимоя қопламалари қоплаш учун вакуум-ёйи плазма манбаининг разряд тизимини ишлаб чиқиш»;

ФА-ФИ-Ф026, 2014-2015 йиллар, «Махсулотлар юзасини ишлов бериш ва уларга ҳимоя қопламалари қўйиш учун вакуумли-ёйи плазма манбасининг разряд тизимини ишлаб чиқиш»; ФА-АЗ-062, 2015-2018 йиллар, «Ионли бомбардимон қилиш шароитида ва реактив газда қопламаларни ион-плазмали усулда чўктириш ва синтез қилиш технологиясини ишлаб чиқиш»; Илмий-тадқиқот ишлари дастури (2020), «Вакуумли-доғли манбаини ишлаб чиқиш».

Диссертация тадқиқотининг мақсади катод доғларида вакуум ёйи разряд жараёнларининг автоэлектрон эмиссияси асосида амалга оширилиш шартларини ва катод доғи хусусиятларини аналитик равишда аниқлаш, катод плазмасининг электрод материаллари юзага яқин қатлами хусусиятларига таъсирини аниқлаш, шунингдек, вольфрам карбиди нанозаррачаларини олиш усуллари, турли геометрияга эга металл махсулотлар юзасини вакуум-ёй усулда ишлов бериш усуллари шакллантиришдан иборат.

Ушбу мақсадга эришиш учун тадқиқотнинг қуйидаги вазифалари шакллантирилди:

вакуум ёй разряднинг катод доғидаги жараёнларнинг F-эмиссия электронлари асосида амалга оширилиш шартларини ва катод нуқтаси хусусиятларини аналитик равишда тадқиқ қилиш;

вакуум ёйи ёрдамида ишлов бериш ва металл юзасини тозалаш жараёнининг микроструктурага, юза қатламининг фазавий таркибига таъсирини ўрганиш;

ишлов берилаётган пўлат юзасига қўйилган паст чиқиш ишига эга моддаларнинг катод нуқталари шаклланиш эҳтимолига, юза қатламини тозалаш жараёни параметрларига таъсирини экспериментал равишда ўрганиш;

металл юзасини вакуум ёй усулда тозалаш ва кейинчалик қопламалар қўйишнинг комплекс жараёнини шакллантириш шартларини ўрганиш;

вакуум ёй разряд орқали генерация қилинган вольфрам оксиди плазмали оқимида вольфрам карбиди қуқунлари синтези жараёнини тадқиқ қилиш ва уни амалга ошириш учун техник шартларни ишлаб чиқиш;

кувурсимон махсулотларнинг ташқи юзасини вакуум-ёй усулда тозалаш ва қопламалар қоплаш жараёнини амалга ошириш усуллари ишлаб чиқиш, битта технологик циклда уларга юқори эксплуатацион хусусиятлар бериш;

коаксиал вакуум-ёй манбадан генерация қилинган плазмали оқимнинг зарядланган ташкил этувчиларини магнит майдони билан бошқариш усулини ишлаб чиқиш.

Тадқиқотнинг объекти. Ёй разряднинг катод доғи авто электрон эмиссияси асосида амалга оширилиш шартлари ва уларнинг металл юзаси хусусиятларига, жумладан, юзага актив моддалар қатлами суртилганда таъсири хусусиятлари, шунингдек, плазмали оқим генерациясида вольфрам карбиди нанокукунлари синтези жараёни.

Тадқиқотнинг предмети: Вакуум ёйи разряднинг катод доғидаги жараёнлар автоэлектрон эмиссияси шартларида, вакуум ёйининг ион-плазмали таъсири металл юзасига, жумладан, юзага актив модда қатлами қўйилган юзага, ишлов берилаётган юзани, шу жумладан, цилиндрик металл махсулотларни тозалаш ва нанокукунлар синтези учун самарали технологик усулларни ишлаб чиқиш.

Тадқиқотнинг усуллари. Диссертация ишини бажаришда қуйидаги тадқиқот усуллари қўлланилди:

нестационар жараёнлар учун математик моделлаштириш;

юқори сезгирликдаги экспериментал аналитик усуллар;

юза структурасини, ғадир-будирлигини ўрганиш учун рентген фазали таҳлил, Mitutoyo SurfTest 401 профилотридан фойдаланиб.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

Илк бор вакуум ёйи катод доғи жараёнларни аналитик тадқиқ қилиш доирасида F-типи электронлар эмиссияси билан вакуум разряди катод материали атомларининг буғланиш иссиқлиги $\lambda_a \sim 1.1 - 1.2$ эВ дан ошмаганда амалга оширилиши аниқланди. Катод доғининг хусусиятлари белгиланди;

металл юзасини вакуум ёйи билан тозалашда оптимал шартлар – анод юзасининг катод геометриясини такрорлаши ва электродлараро масофа 20-35 мм эканлиги аниқланди, бу ҳолда юзага яқин қатламда икки қатламли зона – ташқи қатлами углероддан тозаланган қалинлиги 1 мкм гача ва “оқ қатлам” қалинлиги 10–12 мкм гача шаклланади, унинг мироқаттиқлиги 1,4-1,5 баравар ошади ва 681 кгс/мм² ни ташкил қилади;

илк бор пўлат юзасига қўйилган паст чиқиш ишига эга моддалар вакуум ёй разряди билан пўлат юзасини тозалаш тезлигига, ёй разряднинг ёниш эҳтимолига таъсир қилиши аниқланди, хусусан, КОН ва NaOH нинг юза концентрацияси 20% бўлганда тозалаш тезлиги 1,8 баравар ошади, ишлов берилган юзанинг ғадир-будирлиги эса 2,5 баравар камади;

ишлов берилаётган металл юзасини тозалаш ва кейинчалик қопламалар қўйишнинг комплекс жараёни асослаб чиқилди ва амалга оширилди, бу жараёнларни бир технологик циклда бажариш ишлов берилаётган юзанинг юқори эксплуатацион хусусиятларини шакллантириши кўрсатилди;

вакуум ёй разряди ёрдамида углерод электродларидан иборат бўлган системада техник углерод ва оксид вольфрам глюкоза билан бириктирилиб 100-200 нм ўлчамдаги вольфрам карбиди синтез қилинди.

илк бор қувурнинг ташқи юзасини вакуум-ёй усулида тозалаш ва қопламалар қоплаш технологик тизими ишлаб чиқилди, бу вакуумланган ҳажмда, қувурнинг ташқи юзаси ва корпуснинг ички юзаси томонидан шакллантириладиган разряд тизимининг технологик қисми элементлари сифатида амалга оширилади, Ўзбекистон Республикаси патенти билан ҳимояланган (Ўз Рес.№ IAP 05071, 17.04.2012 й.);

илк бор, металл қувур маҳсулотнинг ташқи юзасига вакуум ёйи таъсирида сканерловчи электр разряд ёрдамида, ишлов бериш ва қоплама қоплаш модуллари билан электр разряд блоки коаксиал равишда қувур маҳсулотининг ташқи юзасига жойлаштирилиб, ишлов берилаётган юза бўйлаб ҳаракатланиши тизими ишлаб чиқилди. Ушбу натижа Ўзбекистон Республикаси патенти билан ҳимояланган (Ўз Рес. 05116, 31.07.2012й).

илк бор, радиал магнит майдони билан плазма манбаини бошқариш тизими ишлаб чиқилди, вакуум ёй плазма манбаининг плазма оқими параметрларини радиал, мультиполь магнит майдони билан бошқарувчи коаксиал магнит тизими ишлаб чиқилди, бу плазма генерацияси самарадорлиги ва ишлов берилаётган маҳсулот юзасини активлаштириш ва қопламалар қўйиш сифатини оширади, Ўзбекистон Республикаси патенти билан ҳимояланган (Ўз Рес. IAP 06630, 20.04.2019 й.).

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

биринчи марта автоэлектрон эмиссиясига эга вакуум ёй разрядининг катод доғларидаги жараёнлар модели аниқланди, бу катод материалининг бир хил оқимини генерация қилиш ва шу орқали металл юзасини сифатли ишлов беришни амалга ошириш имконини беради;

катод доғларининг юза ва юзага яқин қатламга оптимал технологик, жумладан комплекс таъсирини шакллантириш шартлари аниқланди, бу металл катодга юқори эксплуатацион хусусиятлар бериш имконини беради;

биринчи марта цилиндрик маҳсулотнинг ташқи юзасини вакуум ёйининг катод доғлари билан тозалаш, унга қоплама қоплаш жараёнини битта технологик циклда амалга ошириш усули ва техник ечими аниқланди (Ўз Рес. № IAP 05071, 17.04.2012 й.), бу электр разряд блоги модуллари ёрдамида амалга оширилади;

биринчи марта цилиндрик маҳсулотнинг ташқи юзасини вакуум ёйининг катод доғлари билан тозалаш жараёнини сканерловчи электр разряд блоги ёрдамида амалга ошириш усули ва техник ечими аниқланди (Ўз Рес. № IAP 05116 (13) 31.07.2012й.)

биринчи марта вакуум ёйи катод доғлари томонидан генерация қилинган плазмали оқим параметрларини бошқариш усули ва техник ечими ишлаб чиқилди (Ўз Рес.№ IAP 06630, 20.04.2019 й.).

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги замонавий назарий ва экспериментал усуллар, юқори сезгирликдаги масс-спектрометрия, рентген

таҳлили ва атом-кучли электрон микроскопиясидан фойдаланиш билан таъминланади ва тасдиқланади, олинган натижалар бошқа муаллифлар маълумотлари билан яхши мос келади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти катод доғида заряд компонентларининг генерация жараёнларини математик ҳисоб-китоб тадқиқотида олинган натижаларда мужассамлашган. Бу жараёнлар автоэлектрон эмиссияси асосида унинг амалга оширилиш шартларини белгилайди. Катод доғининг F-эмиссия электронлари режимида ёй разряднинг шаклланган модели асослари, катод юза ва юзага яқин қатламида содир бўладиган физик-кимёвий жараёнларни тушунишни кенгайтиради. Катод доғларининг электрод юзасига таъсири ва юза ва юзага яқин қатлам хусусиятларига таъсирининг ўзига хос хусусиятлари бўйича экспериментал тадқиқотлар натижалари вакуум ёйи катод плазмасининг металл юзаси билан ўзаро таъсирида содир бўладиган жараёнларнинг назарий ва амалий тадқиқотларини ривожлантириш учун муҳим маълумотларни тақдим этади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти. янги вакуум-ёйи электр разряд қурилмаларини конструкция қилиш имконияти, шунингдек, махсулотлар юзасини турли хил ифлосланишлардан тозалаш ва ишлов бериш усуллари ва методларини ривожлантириш билан боғлиқ. Бу ишлов берилаётган металл махсулот юзаси хусусиятларини самарали модификация қилиш, унга керакли юқори талабга эга эксплуатацион хусусиятлар бериш, ҳамда, янги наноструктурали материаллар олиш учун долзарб вазифаларни ҳал қилишга хизмат қилади. Ишлаб чиқилган янги техник ечимлар ва махсулотлар юзасини ишлов бериш усуллари, унга бошқариладиган физик хусусиятларга эга кўп функцияли қопламалар қоплаш ва эксплуатацион хусусиятларни таъминлашда катта амалий аҳамиятга эга.

Тадқиқот натижаларини жорий қилиш.

Вакуумли ёй разряди катод доғларининг вакуум шароитидаги қувурсимон буюмларнинг ташқи юзасига таъсирини комплекс таҳлилий ва экспериментал тадқиқотлар асосида:

металл қувур ташқи юзасини ишлов бериш усули ва уни амалга оширишга мўлжалланган қурилмага Республикаси Ўзбекистон патенти олинди (Ўз.Рес. IAP 05071, 17.04.2012 й.), бунда вакуумли ёй разрядининг катод доғлари металл юзасига технологик таъсирини шакллантириш бўйича комплекс тадқиқотлар натижалари қўлланилган. Бу муаммо вакуумли технологик таъсир кўрсатиш зонасини яратиш орқали самарали ҳал этилган, у корпуснинг ички юзаси ва унда коаксиал жойлаштирилган қувур ташқи юзасига ишлов бериш билан амалга оширилади.

Шунингдек, вакуумда цилиндрик айлана (ичи бўш) буюм юзасига электрозарядли таъсир кўрсатиш усули ва уни амалга ошириш қурилмаси бўйича ҳам Ўзбекистон Республикасининг патенти олинди (Ўз.Рес. IAP 05116, 31.07.2012 й.). Унда металл юзага катод доғлари орқали технологик таъсир кўрсатиш асослари ишлаб чиқилиб, коаксиал электрод тизимидан фойдаланиш имкониятлари намоён қилинган. Натижада, ишлов бериш

юзасини тозалаш ва унга қоплама қоплаш жараёнларини ягона технологик циклда амалга оширишнинг оптимал шароитлари белгиланди. Бу эса технологик жараённи оптималлаштириш, унинг самарадорлигини ва маҳсулот юзасининг функционал хусусиятларини ошириш имконини берди.

Вакуумли ёй манбаси плазма оқимини бошқариш усули бўйича ҳам Ўзбекистон Республикаси патенти олинди (Ўз.Рес. № IAP 06630, 17.11.2019 й.), у ерда вакуумли ёйи плазма манбаси оқимиға бошқарувни амалга оширишнинг физик асослари белгиланди. Плазма оқимиға перпендикуляр равишда жойлаштирилган магнит қозиклар орқали радиал, мультиполь магнит майдони ҳосил қилиш усули таклиф этилди. Бу усул, плазмада ионларнинг оптимал фазовий тақсимотини таъминлаш ва ишлов берилувчи юзада тозалаш, активлаш ва қопламалар қоплаш жараёнларини самарали амалга ошириш имконини беради.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси.

Диссертация иши натижалари 26 та халқаро ва республика конференцияларида маъруза қилиниб, муҳокама қилинди.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги: олинган натижалар 40 та илмий ишда баён қилинган, шу жумладан: 14 та илмий журналлардаги мақолалар (8 таси Scopus базасида, 3 таси Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссияси тавсия этган республика журналларида, докторлик диссертацияларининг асосий илмий натижаларини чоп этиш учун), 3 та Ўзбекистон Республикаси патенти, 26 та халқаро илмий конференциялардаги тезислар тақдим этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми

Диссертация тузилиши кириш, бешта боб, хулоса ва адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертация ҳажми 165 саҳифани ташкил қилади, унда 47 та расм ва 6 та жадвал мавжуд.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация иши мавзуси бўйича тадқиқотларнинг долзарблиги ва талабга мувофиқлиги асослаб берилган, диссертациянинг мақсади ва вазифалари шакллантирилган, тадқиқот объектлари, предметлари ва усуллари аниқланган, ҳамда диссертация тадқиқотларининг республикада илм-фан ва технологиялар ривожланишининг устувор йўналишлари билан боғлиқлиги кўрсатилган. Тадқиқотларнинг илмий янгилиги изоҳланган, олинган натижаларнинг ишончилиги асослаб берилган, уларнинг назарий ва амалий аҳамияти очиб берилган, натижаларни жорий қилиш, апробация қилиш тўғрисида маълумотлар келтирилган, ҳамда диссертациянинг ҳажми ва тузилиши ҳақида маълумот берилган.

Биринчи бобда – «Вакуум ёйи разряднинг физик хусусиятлари ва унинг металл юзага технологик таъсири (адабиётлар шарҳи)» – тадқиқот мавзуси бўйича адабиётлар шарҳи ўтказилди. Вакуум-ёйи разрядни, катод плазмасининг генерациясини ва унинг металл юзага таъсирини ўрганиш

бўйича экспериментал ва назарий ишлар таҳлил қилинди. Таҳлил шуни кўрсатдики, ҳозирги кунда катод доғидаги эмиссия жараёнларини ўрганишга, вакуум-ёйи разряд параметрларининг катод доғининг температура таъсири туфайли металл катод юзасидаги структуравий ўзгаришларга таъсирга катта эътибор қаратилмоқда. Бу юқори тозаликдаги металллар олиш, турли қопламалар учун “металл” плазмасининг интенсив оқимларини яратиш, зарядланган заррачаларнинг ток дастасини ҳосил қилиш ва коммутатор техникасини яратиш истиқболлари билан боғлиқ.

Ўтказилган таҳлил асосида ишлов берилаётган маҳсулот юзасига самарали таъсир кўрсатиш усулларини шакллантириш, унга юқори эксплуатацион хусусиятлар бериш, янги материаллар олиш учун вакуум ёйи катод доғи генерация жараёнларини, шунингдек ишлов берилаётган металл юзага таъсирини ўрганиш зарурлиги аниқланди. Кўрсатилган илмий-техник муаммоларнинг етарлича тўлиқ ўрганилмаганлиги диссертация ишининг мақсад ва вазифаларини белгилаш учун асос бўлиб хизмат қилди.

Иккинчи бобда – «Тадқиқот усуллари ва экспериментал вакуум қурилмаси» – тадқиқот усуллари, вакуум ёйи разрядни амалга ошириш ва унинг металл юзага таъсири бўйича тажрибалар ўтказиш учун ишлаб чиқилган вакуум қурилмалари ва электрод тизимлари тасвирланган. Экспериментал тадқиқотлар Вакуумли универсал пости (ВУП) қурилмасида, Ўзбекистон Республикаси Фанлар академиясининг У.А. Арифов номидаги Ион-плазмали ва лазер технологиялари институтининг Ион-плазмали технологиялар лабораториясида ишлаб чиқилган ва тайёрланган вакуумли технологик қурилмаларда ўтказилди. Кўп мақсадли вакуум қурилмалари ва уларнинг асосий элементларининг қисқача тавсифи берилган. Ишда қўйилган вазифаларни бажариш учун вакуум шароитида бир қурилмада металл катод намуналарини вакуум ёйи катод доғлари билан технологик ишлов бериш (юзани тозалаш, катод доғининг иссиқлик ва ион-плазмали таъсирининг катоднинг юза ва юзага яқин қатламларига таъсири, уларнинг физик хусусиятларини ўрганиш) зарур эди.

Олинган натижалар Mitutoyo Surftest SJ 401 қўполлик тестери, ПМТ-3 қаттиқлик ўлчовчиси, ДРОН-2 дифрактометри ва МИМ-8М микроскопи ёрдамида таҳлил қилинди.

Ушбу усуллар ва аналитик асбоблар мажмуаси қуйидагиларни таъминлашга имкон берди: ишлов берилган металл намуна юзасининг ғадир будирлиги ва унинг юзага яқин соҳаси қаттиқлигини тадқиқ қилиш; температура таъсиридан кейин металлнинг юзага яқин қатламидаги структуравий ўзгаришларни таҳлил қилиш. Ишда ишлаб чиқилган усуллар, вакуум-ёйли ион-плазмали технологиянинг янги усуллари ва қурилмалари амалий равишда амалга оширилди ва Ўзбекистон Республикаси патентлари билан ҳимояланди.

Учинчи бобда – «Автоэлектрон эмиссияси билан вакуум ёйи разряди катод доғларининг моҳиятини ва шартларини тадқиқ қилиш» вакуумли ёйи разряднинг катод доғидаги жараёнларни F-эмиссия электронлари асосида

амалга оширилиш шартларини аналитик тадқиқ қилиш амалга оширилди. Катод материали хусусиятлари, атом буғланиш иссиқлиги, атом вазни, электронларнинг чиқиш иши билан вакуумли ёй разряднинг катод доғи параметрлари ўртасидаги ўзаро боғлиқлик ўрганилди. Олинган натижалар асосида металл юза хусусиятларига технологик таъсир кўрсатишнинг самарали усуллари, унинг хусусиятларини модификация қилиш, керакли хусусиятларга эга ион-плазмали оқимларни шакллантириш яратилди. Катоддан вакуум ёйи разрядида автоэлектрон эмиссияси унинг юзасида кучли электр майдони мавжудлиги билан аниқланади, бу майдон мусбат ионларнинг ҳажмий заряди туфайли юзага келади ва катоддан ушбу ионларнинг эркин югуриш йўли тартибидаги масофада (10^{-6} - 10^{-4} см) жойлашган. Катод юзасида мавжуд бўлган электр майдонини, электронлар ва мусбат ионларнинг ҳар қандай берилган ток зичлиги ва катод потенциали пасайиши учун Пуассон тенгламаси ёрдамида аниқлаш мумкин, бу қуйидаги формула билан ифодаланади:

$$\frac{d^2U}{dx^2} = -4\pi\rho \text{ или } \frac{d^2U}{dx^2} = -4\pi \left(\frac{j_i}{v_1} - \frac{j_e}{v_2} \right) \quad (1)$$

Бу ерда j_i , ва j_e мос равишда ионлар ва электронларнинг ток зичлигини, v_i – ионларнинг ҳаракат тезлигини ифодалайди. Ушбу тенгламанинг ечими шуни кўрсатадики, катод доғидаги жараёнлар электронларнинг бир эркин югуриш йўли доирасидаги соҳаларда шаклланади. Бунда j_i ва j_e доимий бўлиб, итиёрий координата ўзгармайди. Бундан ташқари, катод доғи ичидаги v_1 / v_2 тезликлари қуйидаги тенгламалар билан аниқланади:

$$\frac{1}{2} m_i v_1^2 = U e \text{ ва } \frac{1}{2} m_e v_2^2 = (U_c - U) e \quad (2)$$

Бу ерда m_i – мусбат ионнинг массаси, m_e – электроннинг массаси, U_c – катод потенциали. (1) тенгламага (2) тенгламадан v_1 ва v_2 қийматларини қўйиб, қуйидагини олампиз:

$$\frac{d^2U}{dx^2} = -4\pi \left[j_i \sqrt{\frac{m_i}{2Ue}} - j_e \sqrt{\frac{m_e}{2e(U_c-U)}} \right] \quad (3)$$

Ушбу тенглама бир марта интегралланиши мумкин ва электр майдон кучланганлиги E_c учун қиймат беради:

$$E_c^2 = \left(\frac{dU}{dx} \right) = 16\pi \left[j_i \sqrt{\frac{m_i U}{2e}} + j_e \sqrt{\frac{m_e (U_c - U)}{2e}} - j_e \sqrt{\frac{m_e U_c}{2e}} \right] \quad (4)$$

Агар чегара шарти $dU/dx = E = 0$, $x=0$ деб қабул қилинса. Ушбу ифода оддий функция олиш учун интегралланмайди ва уни график интеграциясига ўтиш осонроқдир. Шу мақсадда (4) тенгламани қуйидаги кўринишда қайта ёзиш мумкин:

$$E_c^2 = 7.57 \times \left[j_i \sqrt{1845AU} - j_e \left[\sqrt{U_c} - \sqrt{U_c - U} \right] \right] \quad (4a)$$

Шундан келиб чиқиб, E_c электр майдонини шакллантириш учун зарур бўлган ионлар ток зичлиги қуйидаги ифода билан аниқланади:

$$j_i = \frac{3.07 \times 10^{-8} \cdot E_c^2}{U_c^{0.5} \cdot A^{0.5}}, \text{ А см}^{-2} \quad (5)$$

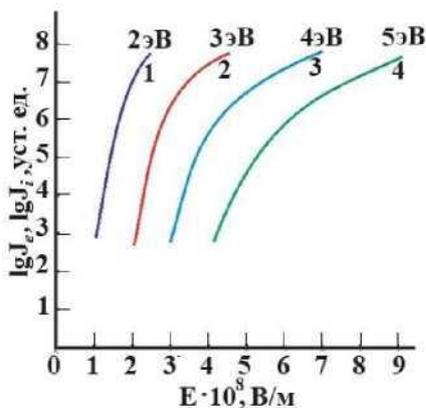
Бу ерда $U_c - V$ да; j_i ва j_e – мос равишда ионлар ва электронларнинг ток зичлиги, ($A \cdot cm^{-2}$) да; m_i и m_e - ион ва электроннинг массалари.

1-расмда электронлар чиқиш иши қийматлари билан фарқ қилувчи катодлар учун $lg j_e = f(E_c)$ га тегишли графиклар (1–4 эгри чизиклар) келтирилган.

Расмдан кўриниб турибдики, 1–4 эгри чизиклар жуда тик эгилган, айниқса, электронлар чиқиш иши ϕ қиймати кичик бўлган катодлар учун. Шу билан бирга, F- эмиссия ток зичлиги $j_e > 10^6 A \cdot cm^{-2}$ ни амалга ошириш учун кучли электр майдони ($E_c > 10^7 V \cdot cm^{-1}$) талаб қилинади. (3) ни (4) га бўлган ҳолда, электронлар ток зичлигининг ионлар ток зичлигига нисбати учун қуйидаги ифодани оламиз.

$$\frac{j_e}{j_i} = \frac{50.5 U_c^{0.5} A_c^{0.5}}{\phi} \exp\left(\frac{6.85 \times 10^7 \phi^{1.5} \theta(y)}{E_c}\right) \quad (6)$$

Кўриниб турибдики, J_e , J_i нисбатининг ϕ ва E_c қийматларига кучли боғлиқлиги. Бироқ, бир қатор сабабларга кўра, бу боғлиқлик чекланиши керак.



1-расм. $lg j_e = f(E_c)$ га тегишли боғлиқлик графиклари, 1–4 эгри чизиклар электронлар чиқиш иши қийматлари билан фарқ қилувчи катодлар учун.

Биринчидан, тажрибалар шуни кўрсатганидек, вакуум-ёй разрядларида ионлар токи улуши анча юқори (ўртача $\alpha \approx 8\%$) ва катоднинг иссиқлик ва электр физик хусусиятлари ҳамда разряд токи ($I_d < 1 kA$) ўзгармайди. Бу катод доғидан (КД) $\nu_{\pi} \sim 10^6 cm^{-1}$ тезликда чиқадиган ва электродлараро бўшлиқни тўлдирадиган катод плазмаси оқимининг квазинейтраллик талаби билан шартланган. Бу эса кенгрок қонуният – энтропия минимуми натижасидир. Ионлар токи ва электронлар токи нисбати учун $\alpha \approx \frac{2V_i}{\langle v_e \rangle}$ ифодаси олинди (бу ерда v_i - ионларнинг тезлиги, $\langle v_e \rangle$ – электронларнинг иссиқлик

тезлиги). Иккинчидан, $10^8 A \cdot cm^{-2}$ ток зичлигида $\ln \frac{j_e}{E_c^2} = f\left(\frac{1}{E_c}\right)$ тўғри чизикли боғлиқликдан кўзга кўринарли четга чиқиш кузатилади. Учинчидан, плазма концентрацияси ўсиши билан заррачаларни ионлар рекомбинацияси эҳтимоли ортиб, бу катоддаги ионлар ток зичлиги қийматини ва, демак, электр майдони миқдорини камайтиради. Унда (5) ни қуйидаги кўринишдаги тенгламага келтириш мумкин

$$\frac{50.5 \cdot U_c^{0.5} \cdot A_c^{0.5}}{\phi} \exp\left(-\frac{6.85 \times 10^7 \cdot \phi^{1.5} \cdot \theta(y)}{E_c}\right) = 13.5. \quad (7)$$

(7) нинг кичик ўзгартиришлари ва логарифмлаштиришдан сўнг $E_{опт}$ оптимал натижалари учун ечим қуйидаги кўринишда олинади:

$$E_{опт} = \frac{2.97 \times 10^7 \cdot \phi^{1.5} \cdot \theta(y)}{0.57 + 0.5(\ln U_c + \ln A_c) - \ln \phi} (B \cdot cm^{-1}). \quad (8)$$

(8) ифода электр майдонининг оптимал қийматини аниқлайди, бу қийматда F-типли электронлар эмиссиясига эга катод доғи (КД) нинг ишлаши энг эҳтимолли бўлади. (8) дан кўриниб турибдики, $E_{\text{опт}}$ катод ва катод доғининг бир қатор параметрларига боғлиқ бўлиб, энг муҳим аҳамиятга эга бўлган параметр электронлар чиқиш ишидир. Экспериментал маълумотлар U_c ва ϕ , A_c , Нордгейм функцияси $\theta(y)$ нинг жадвал қийматларини қўйиб, $E_{\text{опт}}$ ни аниқлаймиз. Масалан, $\phi = 4$ эВ ва $A_c = 10^2$ бўлган катод учун ўртача $U_c = 15$ В да электр майдони кучланиши қиймати $E_{\text{опт}} = 6.45 \cdot 10^7 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$ га тенг бўлади. (8) нинг бажарилиши F-типли электронлар эмиссиясига эга катод доғи мавжудлиги учун зарур, лекин етарли бўлмаган шартдир.

Катод доғларидаги атом-ион баланси.

$E_{\text{опт}}$ электр майдонини амалга ошириш учун иккинчи зарур шарт, бу автоэлектрон эмиссиясини етарли даражада таъминлайди ва (8) ни тўлдиради, катод доғларида (КД) атом-ион балансининг бажарилишидир. Катод доғида мусбат ионларнинг пайдо бўлиши электронлар томонидан катод юзасидан буғланган нейтрал заррачалар (атомлар) нинг урилма ионизацияси натижасида содир бўлади. Шундай қилиб, катодга ионлар оқими (ионлар ток зичлиги) катод материалининг буғланиш интенсивлиги G_c , катод материали атомларининг ўртача ионизация эҳтимоли P_{ic} , ион заряди ва катодга қайтарилган ионлар улуши в билан аниқланади. Катоддан атомларнинг буғланиш тезлиги қуйидаги формула билан аниқланади:

$$G = \rho_c \cdot v_3 \cdot \exp\left(-\frac{\lambda_a}{kT_c}\right), \quad (9)$$

Бу ерда ρ_c - катод материалининг зичлиги, ($\text{г} \cdot \text{см}^{-2}$); v_3 - ўртача товуш тезлиги, ($\text{см} \cdot \text{с}^{-1}$), λ_a - катод атомининг буғланиш иссиқлиги; T_c - катод температураси. (9) дан катодга қайтарилган ионлар ток зичлиги учун қуйидаги ифодани оламиз:

$$j_i = \frac{\beta \cdot g_i \cdot P_{ic} \cdot v_3}{N_a V_0} \exp\left(-\frac{\lambda_a}{kT_i}\right) (\text{А} \cdot \text{см}^{-2}) \quad (10)$$

Бу ерда g_i – ион заряди, $g_i = e$. Бошқа томондан, $E_{\text{оп}}$ микдоридидаги майдонни шакллантириш учун (6) ифода билан аниқланадиган ионлар ток зичлиги талаб қилади. Унда (6) ва (10) дан келиб чиқиб, атом-ион баланси тенгламаси қуйидаги кўринишда бўлади:

$$\frac{\beta \cdot g_i \cdot P_{ic} \cdot v_3 \cdot N_a}{V_0} \exp\left(-\frac{\lambda_a}{kT_i}\right) = \frac{3.07 \times E_c^2}{U_c^{0.5} \cdot A_c^{0.5}}, \quad (11)$$

$$\text{Ечим қуйидаги кўринишга эга.} \quad \frac{\lambda_c (\text{эВ})}{T_c (\text{К})} = \frac{\lg A - \lg B - 2 \lg E_{\text{опт}}}{5.05 \times 10^3}, \quad (12)$$

(11) дан кўриниб турибдики, катод атомининг буғланиш иссиқлигининг доғ температурасига нисбати катоднинг бир қатор параметрларига (ϕ , A_c , V_3 , V_0) ва катод доғининг (U_c , P_i , β) боғлиқ. (12) нинг бажарилиши катод доғи F-эмиссияни амалга ошириш учун иккинчи зарур шартдир.

Катод атомининг буғланиш иссиқлиги ва катод доғи температураси (12)

дан кўриниб турибдики, атом буғланиш иссиқлигининг ортиши билан катод температураси пропорционал равишда ошади, бу температурада $E_{опт}$ шаклланади. Шу билан бирга, катод температурасининг ортиши билан термик кўзгалган электронлар улуши ҳам ортади, уларнинг бир қисми катодга яқин плазмага ўтади. Демак, муайян температурадан бошлаб F-эмиссия механизми термоавтоэмиссияга ўзгаради. Шунинг учун катод доғи F-эмиссияси билан шартларини аниқлашда катод атомининг буғланиш иссиқлиги миқдорини чеклаш зарур, яъни физик жиҳатдан асосланган учинчи шарт – принципни жорий қилиш керак, бу муаммони ҳал қилишга ёрдам беради. Бундай принцип сифатида Ноттингам эффекти хизмат қилиши мумкин. Маълумки, катоднинг муайян температурасида (инверсия температураси деб аталади) Ноттингам иссиқлиги ишораси мусбатдан манфийга ўзгаради. Инверсия температураси T_{in} куйидаги формула билан аниқланади:

$$T_{in} = \frac{5.05 \times 10^{-5}}{\varphi^{0.5}} \quad (13)$$

(бу ерда $E_c - V \cdot \text{см}^{-1}$ да, $\varphi - \text{эВ}$ да, $T_{ин} - \text{К}$ да). Инверсия температурасида катод Ферми сатхидан юқори жойлашган сатхлардан электронлар эмиссияси натижасида йўқотган энергияси Ферми сатхи пастдаги даражалардан эмиссия натижасида катодда ажралган энергияга тенг бўлади. Энергетик жиҳатдан умумий эмиссия токи “соф” F-эмиссияга мос келади (яъни калориметрик бўлмаган эффект

$$\lambda_a = \frac{1.12 \times 10^{-8} \cdot E_{опт} (\lg A - \lg B - 2 \lg E_{опт})}{\varphi^{0.5}} \quad (14)$$

Эслатиб ўтамиз, (14) ифода катод доғида вакуум-ёйли разрядда F- эмиссияси мавжуд бўлган катод атомининг буғланиш иссиқлигини аниқлайди. У учта шартни ҳисобга олади: биринчидан, $E_{опт}$ ни шакллантириш зарурлиги; иккинчидан, $E_{опт}$ амалга оширилганда атом-ион балансининг бажарилиши; учинчидан, Ноттингам эффектидан келиб чиқадиган катод доғи температурасининг чегараланиши. Чунки $E_{опт} \sim \varphi^{3/2}$, (11) га кўра $\lambda_a \sim \varphi$. Демак, катод нуқтасида электронлар эмиссияси F-механизм бўйича амалга оширилганда катод атомининг буғланиш иссиқлиги катоднинг бир қатор параметрларига (φ , A_c , v_s , V_0) ва катод доғининг (U_c , p_c , v , g_i) боғлиқ, лекин асосий аҳамиятга эга бўлган параметр электронлар чиқиш ишидир. Катод атомининг буғланиш иссиқлигини ҳисоблаш шуни кўрсатдики, буғланиш иссиқлиги $\lambda_a = 1.1 - 1.2 \text{эВ}$ дан ошмайди. F-эмиссиянинг температура таъсири билан кучайтирилганлигини (F-T-эмиссия) ҳисобга олганда, λ_a 15–20% юқори бўлиши мумкин. Бироқ, бу ҳолда ҳам λ_a кичик бўлиб қолади – $\lambda_a \leq 1.5 - 1.6 \text{эВ}$. Шундай қилиб, катод доғи F-эмиссия электронлари $\lambda_a \leq 1.5 - 1.6 \text{эВ}$ бўлган катодларга хос эканини айтиш мумкин. Буларга Zn, Cd ва Hg металлари киради. Кўпчилик металллар $\lambda_a > 2 - 2.5 \text{эВ}$ га эга бўлиб, улар учун вакуум- ёйи разряднинг катод доғида T-F-эмиссия электронлари хосдир.

Вакуум ёй разряднинг катод доғи тузилиши.

Агар доғдаги ток ўсиши ҳар бир микродоғнинг ўртача икки қисмга бўлиниши натижасида τ_0 вақт интервали оралиғида содир бўлади деб фараз

қилинса, унда t вақт моментида уларнинг сони N_n қуйидагича бўлади:

$$N_n = N_0 \cdot 2^{\frac{t}{\tau_0}} \quad I_n = I_0 \cdot 2^{\frac{t}{\tau_0}} \quad (15)$$

(15) бу ерда N_0 – бошланғич ячейкалар сони.

Бирок, ячейкалар сони ва доғ токи чекланмаган ҳолда ошиши мумкин эмас. N_n ва I_n нинг чегараланиши катод микродоғининг ўртасидаги тенг масофа ($L_0 \cong 10^{-4}$ см), мавжудлиги билан шартланган, бу ток оқими зонасида қўшимча потенциал пасайиши билан боғлиқ. Ток сиқилиши соҳасининг қаршилиги $R = \rho/d$ ифодаси билан аниқланади (бу ерда ρ - узига хос қаршилиқ, d – токни катод доғи соҳасига олиб кирувчи соҳа ўлчами). Ўзгартиришлардан сўнг $\Delta U = \frac{\pi}{4} j dp(T)$. олинади. Микродоғ зонасида катод юзаси исинганда, ҳатто яхши ток ўтказгичлар учун ҳам қўшимча потенциал пасайиши 0.1–0.5 В га етади. ~ 10 –15 нс давомийликдаги иссиқ манба таъсири вақтида иссиқлик тўлкини $\cong 10^{-4}$ см масофага (яъни т.е. $X \cong L_0$) тарқалади. Микродоғнинг мавжудлик вақти $\tau \cong 15$ нс бўлиб, “доимий” яшаш вақти τ_1 ва сакраш вақти τ_2 ни ўз ичига олади. L_0 ва τ_0 қийматларини билиб, микродоғнинг кўчиш тезлигини (ёки катод доғи ўлчамларининг ўсиш тезлигини) $v_0 = \frac{L_0}{\tau_0}$, сифатида баҳолаймиз, бу мис катод учун $v_0 \cong 7 \cdot 10^3$ см/с қийматни беради. Бўлиниш жараёнида микродоғлар дастлабки марказдан сакраб чиқиб кетади (яъни якуний катод доғи диаметри ошади), бу микродоғи ўртасидаги ўртача масофа L_0 гача камаяди. Шундан келиб чиқиб, катод доғини шакллантириш учун L_0 учун формулани қуйидагича ёзиш мумкин:

$$L_0 \cong \frac{\pi(\tau_0 + v_0 t)}{2^{\frac{t}{\tau_0} - 1}} \quad (16)$$

(16) нинг ечими $t \cong 10^{-7}$ с ни беради, бу катод доғининг шаклланиш вақтини характерлайди. Кейинчалик катод доғининг кенгайиши кескин секинлашади, яъни L_0 нинг мавжудлиги ўлчамлар ва доғ токи микдорининг ўсишини чекловчи “девор” ролини ўйнайди. Катод доғининг максимал ўлчами шаклланиш тугаган пайтда $d_n = 2(\tau_0 + v_0 t) \cong 13 - 15$ мкм. (16) дан катод доғи диаметрининг унинг токи билан боғлиқлиги ҳам келиб чиқади: $I_n = \frac{2\pi d_n I_0}{L_0}$ яъни $I_n \sim d_n$, d_n эмас. (15) дан фойдаланиб, ячейкалар сони ва доғ токи топилиши мумкин (мис катод учун $N \cong 50 - 60$ и $I_n = 90 - 100$ А). Агар разряд токи I_n дан ошса, иккинчи, учинчи ва бошқа доғлар шакллана бошлайди. Доғ доирасидаги ўртача ток зичлиги:

$$j = \frac{4I_n}{\pi d_n^2} \cong 7 \cdot 10^7 \text{ А/см}^2 \quad (17)$$

Бунда, ячейкалардаги ток зичлиги 3–4 марта юқори бўлиб, портлаш эмиссиясига мос келади. Катод температурасининг ўсиши билан ток зичлиги камайиши мумкин, бироқ, энг камида қийин эрувчи катодлар учун у 10^8 А/см² га тенг.

Вакуум ёй разряднинг катод доғи параметрлари.

Электронлар эмиссияси F-тип бўйича амалга оширилади деб ҳисоблаб, катод нуқтасининг муҳим параметрлари – катод юзасидаги электр майдони кучланиши (E), катод нуқтаси ўлчамлари, катод нуқтаси таъсир соҳасидаги юза температураси (T) аниқланади. Вакуум-ёйи разрядларнинг ион токи улуши $a \sim 8 \times 10^{-2}$ катод материали ва разряд токидан ($I_0 < \text{кА}$) қатъи назар ўзгармайди. Катод доғидаги ток баланси тенгламаси қуйидаги кўринишга эга:

$$\frac{1.54 \times 10^{-6}}{\varphi t^2(\psi)} \exp \left[-\frac{6.83 \times 10^7 \varphi^{\frac{3}{2}} \vartheta(\psi)}{E_c} \right] = \frac{3.07 \times 10^{-7}}{U_c^{0.5} A^{0.5}} \quad (18)$$

(18) нинг ўнг қисми U_c ва A га боғлиқ бўлиб, улар етарли даражада аниқ чап қисми $\frac{j_e}{E^2} = f(E)$. га тегишли боғлиқликни ифодалайди. Нордгейм функциясидан аналитик боғлиқлик сифатида (18) да фойдаланиш

$$(\psi) = 1 - \psi^2 \left[0,3750 \ln \frac{1}{\psi} + 0,9673 \right] - 0,0327 \psi^4, \text{ где } \psi = \frac{3,8 \times 10^{-4} E^{0,5}}{\varphi}$$

(5) ни ечиш катод нуқтасининг F-типли эмиссияси учун зарур бўлган электр майдони кучланишини аниқлашга имкон беради. Ечим натижалари жадвалда келтирилган. Катод параметрларига қараб, нуқтадаги электр майдони $E = (1-6)10^7 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$ ни ташкил қилади. (18) га кўра, F-эмиссияда зарур ионлар ток зичлиги қуйидаги ифода билан аниқланади:

$$j_i = \frac{3.07 \times 10^{-8} \cdot E_c^2}{U_c^{0.5} \cdot A_c^{0.5}} \quad (\text{А см}^{-2}) \quad (19)$$

Катодга ионлар оқими катоддан атомларнинг буғланиш интензивлиги v_a , атомларнинг ионизация эҳтимоли P_i ва катодга қайтарилган ионлар улуши (J га боғлиқ. Буғланган атомлар оқими доғ температураси ва катоднинг иссиқлик-физик хусусиятларига қараб қуйидаги ифода билан аниқланади:

$$v_a = \frac{10^{c-0,5 \lg T - \frac{B}{T}}}{m_a} \quad (20)$$

(бу ерда C ва B – Дешман буғланиш константалари). Демак, ионлар ток зичлиги:

$$j_i = \frac{\beta P_i g_i}{m_a} 10^{c-0,5 \lg T - \frac{B}{T}} \quad (21)$$

(21)га кўра, ионлар ток зичлиги кўплаб параметрларга боғлиқ. Асосий аҳамиятга нуқта температураси ва катоднинг буғланиш константалари эга. (21) дан доғ температураси учун ифода келиб чиқади

$$\frac{B}{T} + 0,5 \lg T = C + \lg \gamma - \lg j_i \quad \text{где } \gamma = \frac{\beta P_i g_i}{m_a} \quad (22)$$

Катод доғи температурасини аниқлашда у формуласига кирувчи қийматлари қабул қилинди: β, P_i ва $g_i, \beta = 0.6-0.7, P_i = 0.3-0.4$.

Жадвал 1 да (22) тенгламаларининг турли катод материаллари учун ечим натижалари келтирилган.

F-типли эмиссияга эга катод доғи (КД) параметрлари

element	A	p эВ	θ эВ	$E \cdot 10^{-7}$ В/см	$j_i \cdot 10^{-6}$ А*см ²	$j_i \cdot 10^{-6}$ А*см ²	T_n , К	T_k , К	d мкм	Emis siya
Cs	133	1,80	0,80	1,14	0,124	0,16	1440	960	1,70	F
Li	7	2,38	1,67	2,03	1,24	(1,61)	2500	1600	-	T-F
Mg	24	3,64	1,53	4,25	3,21	4,17	2470	1399	0,65	F
Ca	40	2,22	1,85	2,59	1,03	(1,34)	2960	1755	-	T-F
Pb	207	4,00	2,04	4,57	1,29	(1,68)	5200	2010	-	T-F
Hg	200	4,50	0,64	5,71	2,24	2,92	1210	634	0,31	F

$j_i < 10^8 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ ток зичлигида катод доғидаги асосий энергия манбаи ион бомбардимон қилишдир. Манбанинг солиштирма қуввати $W_i = j_i \cdot (\alpha U_c + U_i - \varphi)$ ифодаси билан аниқланади (бу ерда α - аккомодация коэффиценти, $\alpha \approx 1$, U_i - ионизация потенциаллари). F-типли эмиссияга эга нуктада энергия истеъмолчилари буғланиш, иссиқлик ўтказувчанлик ва нурланишдир (охиргисига, одатда, эътибор берилмайди). Буғланишдаги энергия йукотишлари $W_{ис} = (1 - \beta P_i) \theta v_a$ булади. Иссиқлик ўтказувчанлик орқали олиб ташланадиган энергия $W_T = 2\lambda d_n (T_n - T_0)$ ифодаси билан аниқланади (бу ерда d_n - нукта диаметри, λ - иссиқлик ўтказувчанлик коэффиценти, T_0 - катод температураси, $T_0 \ll T_n$). Унда энергетик баланс тенгламаси куйидаги кўринишга эга бўлади:

$$\beta P_i g v_a (\alpha U_c + U_i - \varphi) = (1 - \beta P_i) \theta v_a + \frac{8\lambda(T_n - T_0)}{\pi d_n} \quad (23)$$

Шундан келиб чиқиб, катод доғи ўлчами учун ифода олинади:

$$d_n = \frac{8\lambda m_a T_n}{\pi \beta \left[P_i g (\alpha U_c + U_i - \varphi) - \frac{(1 - \beta P_i) \theta v_a}{\beta} \right] 10^{c - 0,5 \log T - \frac{B}{T}}}, \quad d_n = \frac{8\lambda T_n}{\pi \left[\alpha U_c + U_i - \varphi - \frac{(1 - \beta P_i) \theta}{\beta P_i} \right] j_i} \quad (24)$$

Катодларнинг иссиқлик ва электр хусусиятларига қараб, $\lambda = 2\lambda_a$ ни ҳисобга олиб, $d_n = 0,3-0,7$ мкм олинди. d_n нинг юқори қийматлари $\varphi < 2$ эВ ва $\theta < 1$ эВ бўлган катодларга хосдир. p ва θ ортган сари улар $d_n = 0,3-0,5$ мкм гача пасаяди. Баҳолашлар шуни кўрсатадики, доғ диаметрининг ўзгариш диапазони d_n дан 12-15% дан ошмайди. Ионлар ва электронлар ток зичлигининг кучлироқ боғлиқлиги катод нуктаси температурасидан намоён булади. Бу айниқса φ ва θ қийматлари кичик бўлган катодларга хосдир:

$$j_i \sim \exp\left(-\frac{\theta}{kT}\right) j_e \sim \exp\left(-\frac{\varphi^2}{E}\right) u E_{\pi} \sim \exp\left(-\frac{\theta}{2kT}\right) \quad (25)$$

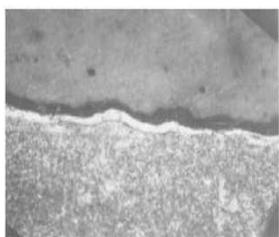
Доғ температурасининг 10–12% га ўзгариши ионлар ток зичлигининг ~100% га ўзгаришига олиб келади. Электрон эмиссияси ток зичлиги учун $j_e = f(T)$ боғлиқлиги янада кучлироқдир. Нукта температурасининг 2-5% га ошиши

электронлар ток зичлигини тахминан бир даражага ошириш учун етарлидир. Эҳтимол, бу омиллар F-типли эмиссияга эга катод нуқтасининг сезиларли даражада ностационарлигини тушунтиради, бу “совук” катодлар билан ўтказилган экспериментларда бир неча бор кузатилган.

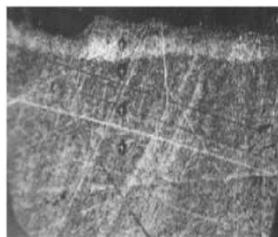
Тўртинчи боб «Металл юзага вакуум ёйи таъсири шакллантириш» ишлов бериш жараёнида, унинг микроструктурага, юза қатламининг элемент ва фаза таркибига, ҳамда, ишлов берилаётган пўлат юзасининг морфологиясига таъсири ўрганилди. Металл юзасини Вакуум ёйли разряднинг катод нуқталари билан тозалаш жараёни параметрлари экспериментал равишда ўрганилди. Аниқланишича, тозаланаётган катод юзаси – қувур ва аноднинг ишчи юзаси ўртасидаги оптимал масофа 20–35 мм ни ташкил қилади, аноднинг ишчи юзасининг оптимал геометрияси катод геометриясини такрорловчи юзадир.

Вакуум ёйли катод нуқталарининг металл юзага таъсири натижасида катоднинг юзага яқин материалы таъсир марказий зонасида буғ ҳолатига, ўрта зонада суюқ ҳолатга ўтади, периферия зонасида эса муайян температурагача қизийди. 2-расмда Вакуум ёйли разряд билан ишлов берилган пўлат намунасининг кўндаланг кесими шлифининг фотосуратлари келтирилган.

Юзага яқин қатламда икки қатламли модификацияланган зона шаклланади, у тўқ рангли углероддан тозаланган ташқи қатламдан (қалинлиги 1 мкм гача, микроқаттиқлик $275 \text{ кгс} \cdot \text{мм}^{-2}$) ва ундан кейинги очиқ рангли “оқ қатлам” дан (кенглиги 10–12 мкм, микроқаттиқлик $681 \text{ кгс} \cdot \text{мм}^{-2}$) иборат бўлиб, асоснинг микротвердosti $346 \text{ кгс} \cdot \text{мм}^{-2}$ ни ташкил қилади. Шундай қилиб, қалинлиги 10 мкм гача бўлган модификацияланган қатламнинг микроқаттиқлик 1.4–1.5 мартага ошади. Бунда юзани тозалаш учун энергия сарфи оксид қатлами қалинлигига қараб 1 мкм учун 0.13 дан 0.5 кВт/соат гача бўлади.



а

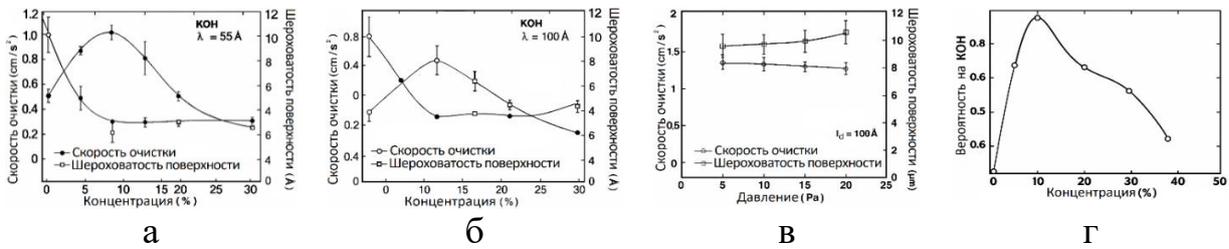


б

2-расм. Вакуум ёйи разряд билан ишлов берилган пўлат намунасининг кўндаланг кесими шлифининг фотосуратлари. а- “оқ қатлам”, б- асосда пирамида кўринишидаги излари билан.

Электронлар чиқиш иши паст бўлган моддалар (МЮА) нинг вакуум- ёй разряд билан ишлов берилаётган металл юзага (20% гача эритма) қўлланилишининг тозалаш тезлиги ва ишлов берилган юза кўполлигига таъсири бўйича экспериментал тадқиқот натижалари 3а, б-расмларда келтирилган. Кўрсатилганки, МЮА концентрацияси ортган сари ситр ғадир будирлиги тез пасаяди ва минимал қийматга (10%–15%)

етади, бу нол концентрацияга нисбатан тахминан 2.5 марта камдир.

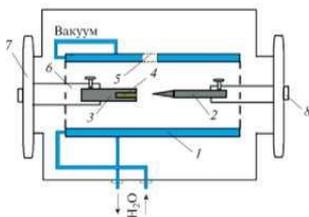


3-расм. Юза кўполлиги ва тозалаш тезлигининг а) КОН ва NaOH концентрациясига боғлиқлиги: а – Вакуум ёйли разряд (ВЁР) токи 50 А; б – ВЁР токи 110 А; в – қолдиқ муҳит босими; г – МЮА концентрациясига қараб элементар катод нуқталари (ЭКД) пайдо бўлиш эҳтимоли.

МЮА концентрацияси 15% дан юқори бўлганда кўполлик секин ортади, тозалаш тезлиги эса 10% МЮА концентрациясида аниқ ифодаланган максимумга эга бўлиб, бу максимумдан узокдаги қийматга нисбатан 1.8 марта юқоридир. Юза кўполлигини камайтириш ва тозалаш тезлигини ошириш бўйича энг оптимал натижалар КОН ва NaOH учун олинди. Тозалаш тезлиги 5–20 Па босим интервалида амалда босимга боғлиқ эмас, 3в-расм. КОН ва NaOH концентрацияси ортганда кўполлик секин ортади, тезлик эса 10% концентрацияда аниқ максимумга эга бўлиб, максимумдан узокдаги қийматдан 1.8 марта юқоридир.

Шу билан бирга, элементар катод нуқталари пайдо бўлиш эҳтимоли экстремумининг МЮА концентрациясига нисбатан жойлашуви ўртасида корреляция аниқланди (3г-расм), бу МЮА мавжудлигида металл юзани тозалаш жараёни параметрларининг ўзгариши катод нуқталари пайдо бўлиш эҳтимолининг ўзгариши билан шартланганини кўрсатади. Катод нуқтасининг юзада шаклланиш эҳтимоли 0.001 г/см² юза-актив моддалар (МЮА) юза концентрациясида максимал қийматга етади. Шунинг учун МЮА аралашмасини танлаш орқали ишлов беришнинг керакли параметрлари ва юза хусусиятларини мақсадли равишда олиш мумкин.

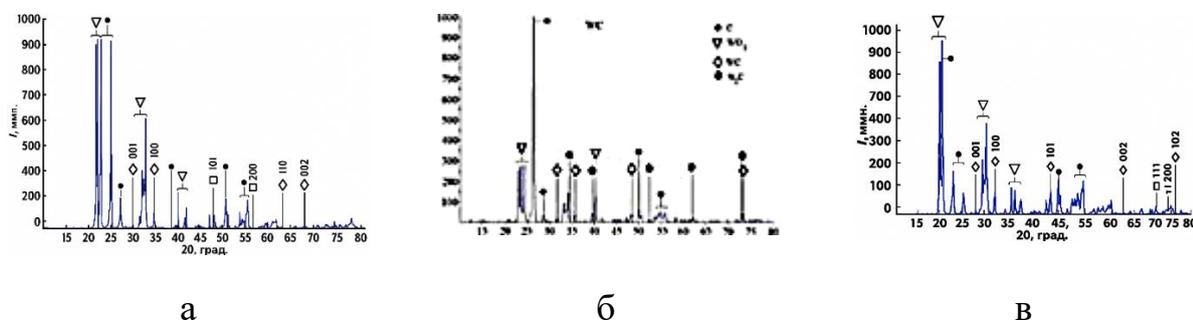
Вакуум ёй разряди орқали вольфрам оксиди плазма оқимини генерация қилиш жараёнида вольфрам карбиди нанокукунлари синтези жараёни ўрганилди.



4-расм. Вольфрам карбиди нанокукунлари синтези жараёнини амалга ошириш учун экспериментал разряд тизими схемаси: 1- совутгич экран; 2-графит катод; 3- таркибий электрод анод; 4- вольфрам карбидининг Вакуум ёйли синтези жараёни фотосурати.

Вольфрам карбиди заррачалари синтези графит катоддан углерод ионлари билан вакуум ёйли ион-плазмали таъсир орқали анод учуда анод плазмасида жойлашган, боғловчи материал билан вольфрам оксиди кукунлари таблеткаси орқали амалга оширилади. Вольфрам оксиди WO₃ дан олинган вольфрам карбиди

нанокукунлари турли боғловчи ишлатилиб, кукунли рентген дифрактометрида ўрганилди. Аввал фақат техник углерод сакловчи таблеткадан синтез қилинган нанокукунларнинг юза фазаси ўрганилди. ба- расмда бу намунанинг рентгенограммаси келтирилган. Кўриниб турибдики, ўрганилаётган объект бир неча фазадан иборат бўлиб, ҳар бир фазага ўзига хос дифракцион нақш мос келади.



5-расм. Вольфрам карбиди нанокукунлари (НК) чанглари рентгенограммалари ҳар хил боғловчилар билан, техник углерод олинган – а, шавел кислотаси – б, глюкоза – в.

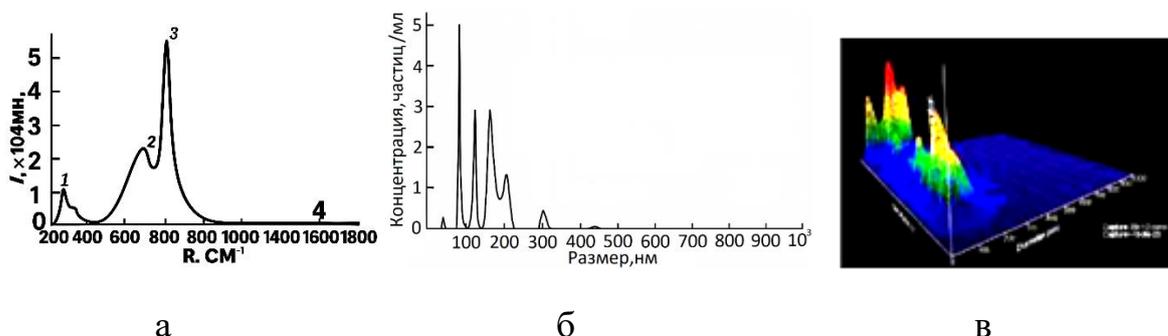
5а-расмда кузатилган дифракцион рефлекслар вольфрам монокарбиди (WC), вольфрам (W), графит ва вольфрам оксиди (WO_3) га мос келади, бу техник углерод боғловчи материал билан олинган. Рентгенограммада энг юқори интенсивликдаги рефлекс ($2\theta = 26.6^\circ$ да) графитга тегишли. Бошқа интенсив рефлекслар рентгенограммада WO_3 га мос келади. Вольфрам монокарбиди (WC) нанозаррачаларининг кристалл тузилиши гексагонал бўлиб, кристаллографик гуруҳ P-6 m^2 га мос келади, бу адабиёт маълумотларига тўлиқ жавоб беради. Рентгенограмма таҳлили шуни кўрсатадики, кукуннинг аморф қисми 68.63% ни, (демак, кристаллик даражаси – 31.37%) ташкил қилади.

5б-расмда шавел кислотали таблеткадан олинган вольфрам карбиди нанокукунлари (НК) нинг рентгенограммаси келтирилган. Намуна спектри 2θ бурчагида (фаза таҳлили) олинган. 6б-расмдан кўриниб турибдики, 2θ бурчаклари 31.45° , 35.65° , 48.4° , 64.1° , 73.3° , 66.1° , 75.9° ва 76.95° да вольфрам монокарбиди (WC) нанозаррачаларига мос дифракцион рефлекслар кузатилди. 2θ бурчаклари 34.5° , 38.2° , 39.6° ва 52.3° да вольфрам яримкарбиди (W_2C) нанозаррачаларига мос дифракцион рефлекслар кузатилди. 26.6° бурчакдаги интенсив рефлекс графитга тегишли бўлиб, углерод (C) га тегишли бир неча нисбатан паст интенсивликдаги рефлекслар ҳам кузатилди. Рентгенограммада 23.59° , 24.39° , 34.19° ва 40.34° бурчаклардаги интенсив рефлекслар WO_3 га мос келади.

5в-расмда Вакуум ёйли разряд плазмасида олинган вольфрам карбиди нанокукунларининг рентгенограммаси келтирилган. WC нанокукунлари боғловчи сифатида глюкоза ишлатилган таблеткадан олинган. Нанокукунлар спектри $\theta-2\theta$ бурчакларида (тўлиқ профил таҳлили) олинган. Рентгенограммадан кўриниб турибдики, ўрганилаётган объект бир неча

фазадан иборат бўлиб, ҳар бир фазага ўзига хос дифракцион нақш мос келади. Ҳар бир фаза рефлексларининг интенсивлиги ўрганилаётган аралашмадаги улушига ва кристаллашув даражасига боғлиқ.

5-в-расмда кўрсатилган рентгенограмма пиклари углерод (C) фазаси, вольфрам яримкарбиди (W_2C) ва кубиксимон вольфрам карбиди (WC_{1-x}) мавжудлигини кўрсатади. Углерод чўққиларининг кенгайиши ушбу композитларда углерод заррачалари жуда кичик ўлчамга эга эканини англатади. Натижала углероднинг sp^2 -гибритланишига олиб келади. Ушбу рентгенограммада вольфрам монокарбиди (WC) пиклари кузатилмади. Бундан келиб чиқиб, вольфрам карбиди нанокукунлари синтезида юқори температура градиенти мавжуд бўлгани ва бу вольфрам карбиди нанозаррачалари шаклланишига таъсир қилганини айтиш мумкин. Рентгенограммалар таҳлили шуни кўрсатадики, кукуннинг аморфлашуви 13.3%, кристаллик даражаси эса 86.7% ни ташкил қилади.



6-расм. а-глюкозали таблеткадан олинган вольфрам карбиди нанокукунининг комбинацион сочилиш спектри. Рақамлар билан тўлқин сонларидаги муҳим пиклар белгиланган: 254 (1); 694 (2); 805 (3) ва 1561 см^{-1} (4). б - заррачаларнинг ўртача ўлчамлари спектри. в – вольфрам карбиди нанокукунлари заррачаларининг уч ўлчовли тақсимооти.

Синтез қилинган нанокукунларнинг структуравий хусусиятларини аниқлаш учун комбинацион сочилиш спектроскопия усули қўлланилди. 6-расмда глюкоза ишлатилиб синтез қилинган маҳсулот учун олинган бундай спектр келтирилган.

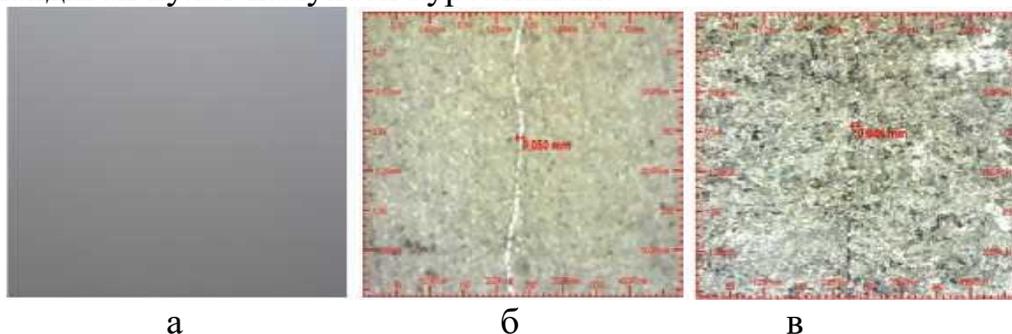
Соф вольфрам карбиди кристалл тузилишининг қаттиқлиги туфайли комбинацион сочилишда сигнал бермайди. Олинган спектрда эса O–W–O боғлари узунлиги тебранишлари туфайли пайдо бўлган кенг чизиқлар (тўлқин сонлари 694, 805 ва 254 см^{-1} да) мавжуд. $k = 1561\text{ см}^{-1}$ даги паст интенсивликдаги сигнал углеродга тегишли деб ҳисобланади. Поликристалл намуналарда сочилишда бу пикнинг катталиги монокристаллга нисбатан кристаллит чегараларида кўплаб нуқсонлар мавжудлиги туфайли юқори бўлиши мумкин. Вольфрам карбидига мос пикларнинг йўқлиги бу модданинг металл хусусияти билан яхши мос келади. 7в-расмда глюкоза ишлатилиб олинган вольфрам карбиди нанокукунлари заррачаларининг ўлчамлар бўйича уч ўлчовли тақсимооти келтирилган. Синтез қилинган ҳиссачалар ўлчамларининг

диапазони анча кенг. Тақсимот эгри чизиғи (4.5б-расм) тез кўтарилиб, тез тушади, энг юқори кузатилган концентрация 100–200 нм ўлчамли заррачалар учун олинган, асосий заррачалар ўлчамлари 37–299 нм ни ташкил қилади.

Вакуум ёйи ёрдамида тозалаш ва кейинги қоплама қўйишнинг комплекс жараёнини шакллантириш шартларини ўрганиш.

Вакуум ёйи орқали тозалаш режаларини ўрганиш ва оптимизация қилиш, металл намуналар юзасини ишлов бериш ва бир технологик циклда қоплама қўйишга қаратилган. Вакуум-ёйли электрод тизимининг турли геометрияли элементлари қабул қиладиган иссиқлик энергиясининг тақсимланиши бўйича экспериментал тадқиқот шуни кўрсатдики, диск шаклидаги анодга вакуум-ёйи разряд энергиясининг 71%–75% гача ($\eta_{ан}=0.75$) иссиқлик энергияси ўтади. Катод ва анод ўртасидаги масофа ортган сари узатилган иссиқлик энергияси миқдори 4–10% га камаяди, изоляцияланган цилиндрик иссиқлик зонди қабул қиладиган иссиқлик энергияси η -11–12% ни ташкил қилади ва катод-анод масофаси ортганда янада сезиларли – 30% га камаяди. Катод олган иссиқлик энергияси улуши импульсли ёй разряд энергиясининг 12–13% ни ташкил қилиши ва анод геометрияси ўзгарганда ўзгармаслиги аниқланди.

Металл юзанинг вакуум-ёйи билан тўлиқ тозаланиши юза заряд зичлиги $(112–115) \cdot 10^4$ Кл/м² да амалга оширилгани аниқланди. Материални 1 К даражага қиздириш учун зарур бўлган $(8.7–9.4)$ К/м² ни ҳисобга олганда, намуна юзаси 708.15 К гача қизади. 7-расмда фотосуратлар келтирилган: бир технологик циклда вакуум-ёйи билан ишлов берилган металл юзага қўйилган зангламайдиган пўлат қопламаси – а. 7б фотосуратда зангламайдиган пўлат қопламасининг оптик электрон микроскопда олинган тасвири (500 марта катталаштириш) чизик билан, 7в-расмда 100г юк остида чизикли зангламайдиган пўлат намунаси кўрсатилган.



7-расм. Фотосуратлар: зангламайдиган пўлатдан қоплама – а, чизикли қоплама – б ва 100 г юк остида чизикли – в.

Олинган натижалар шуни кўрсатадики, вакуум-ёйи билан тозаланган юзага ёй разряди плазма оқимидан қўйилган қопламалар бир технологик циклда пускатилган материалга мос структура ва стехиометрик таркибга эга бўлиб, юқори мустаҳкамликка эга

Бешинчи бобда «Вакуум ёйи технологик ион-плазмали таъсири жараёнини қувурсимон махсулотнинг ташқи юзасига шакллантириш»
Бешинчи бобда вакуум ёй разрядни бошлаш электрод тизими ишлаб чиқилди

ва ўрганилди. 8-расмда икки электродли игнайтер схемаси – а, ва ёй разряди генерацияси эҳтимоли $P(\%)$ – б келтирилган. Ўтказилган тадқиқотлар шуни кўрсатдики, графитдан плазма ҳосил қилувчи аралашма билан игнайтер орқали Вакуум ёйли разрядни бошлашда (8а-рasm, 2-эгри чизик) учкун эҳтимоли 80% ни ташкил қилади.



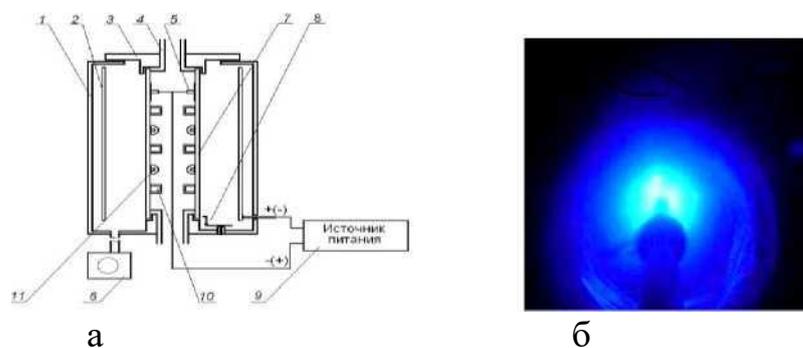
8-расм. Схема: а - икки электродли игнайтер, б - дугали разряд генерацияси эҳтимоли график $P(\%)$.

Графит ва кумуш кукуни аралашмасига эга игнайтер билан вакуум-дугани бошлашда учкун эҳтимоли 93% ни ташкил қилади (1-эгри чизик), бу графит кукуни билан солиштирганда 10% га кўпдир. Шундай қилиб, қўшимча компонентлар, масалан, кумуш кукуни мавжудлиги игнайтер самарадорлигини оширади, чунки бу қўшимча электронлар чиқиш ишининг пастлиги туфайли электрон эмиссиясини сезиларли даражада кўпайтиради.

Технологик концепция ўрганилди ва ишлаб чиқилди, вакуумда ёйи разряд плазмасининг металл қувур ташқи юзасига таъсирининг янги усуллари ва технологик тизимлари ишлаб чиқилди, бу ишлов берилган металл қувур юзасининг юқори сифатли параметрларини шакллантиришни таъминлайди.

9-расмда қувур материалининг ташқи юзасига вакуум-ёйининг катод плазмаси билан технологик таъсирни амалга ошириш учун биз томонидан ишлаб чиқилган техник тизим келтирилган.

Вакуум ёйли разряд билан таъсир герметик ҳажмда амалга оширилади, бу ҳажм қобиғининг ички юзаси билан шакллантирилади, унда металл пўлат қувур ва унинг ишлов бериладиган ташқи юза деворлари жойлашган. Қобик қувурни коаксиал жойлаштириш учун герметик элементлар билан посадка қурилмалари билан жиҳозланган. Натижада, биз томонидан яратилган, янгиликка эга ва РЎз. патенти билан ҳимояланган тизимда металл қувурнинг ташқи юзасини ишлов бериш ва тозалашнинг реал имконияти яратилди, бу қувур катод сифатида, технологик вакуум зонасида қувур атрофида жойлашган электрод ёки қобик эса анод сифатида ишлатилади.



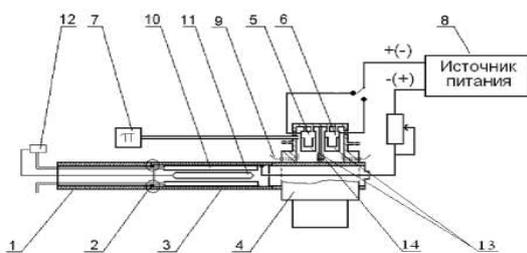
9-расм. Қувур ташқи юзасига вакуум-ёйининг катод плазмаси билан технологик таъсирни амалга ошириш техник тизими схемаси – а, қувур ташқи юзасини тозалаш жараёни фотосурати – б.

Ушбу конструкция қувур ташқи юзасига ишлов берилётган қувур ташқи юзаси устида жойлашган электрод материалдан қоплама қўйиш имконини ҳам беради, бу электрод катод сифатида ишлатилади. Анод сифатида эса биз махсулотнинг ўзини ва (ёки) бошқа электродни ишлатдик. Қувурини ташқи юзасини тозалаш ва унга ҳимояловчи, мустаҳкамловчи қопламалар (электрод материалдан) қўйишни бирлашган технологик циклда, кетма-кет технологик ишлов бериш режимида амалга ошириш имконияти кўрсатилди.

Биз томонидан яратилган ва қўлланилган, янгиликка эга ва РЎз. патенти билан ҳимояланган бошқа техник тизимда металл қувур ташқи юзасини ёй разряди билан ишлов беришда Вакуум ёйли разряд билан таъсир герметик ҳажмда амалга оширилди, бу ҳажм ишлов берилётган қувурнинг ташқи юзаси, икки цилиндрик ток олиб кирувчи ўртасида жойлашган ва электр разряд блоги қобиғининг ички юзаси билан шакллантирилади, қувур ташқи юзасида коаксиал, герметик жойлаштирилган. 10-расмда қувур ташқи юзасига вакуум-ёйли технологик таъсирни амалга ошириш техник тизими схемаси келтирилган.

Қурилма ток олиб кирувчилар – 1, қўллаб-қувватловчи герметик бўйинлар – 2, ишлов берилётган махсулот – қувур – 3, электр разряд блоги – 4, ёйли ишлов тозалаш модуллари – 5 ва қоплама қўйиш модули – 6, вакуумлаш тизими – 7, доимий ток манбаи – 8, осциллятор – 9, совутиш тизими – 10 ва қиздириш элементи – 11 ни ўз ичига олади. Электр разряд блоги 4 ни қувур ишлов берилётган юзаси бўйлаб кўчириб, вакуум-дуга билан қувур ташқи юзаси тозаланади, қувур катод сифатида, электр разряд блоги корпусининг ички бўшлиғида жойлашган. Электрод ёки корпус эса анод сифатида ишлатилади. Қувур ташқи юзасига қопламалар қўйилади, қувур анод сифатида, корпусда жойлашган коаксиал электрод эса катод сифатида ишлатилиб, унинг материалга ишлов берилётган юзага қўйилади.

Тозалаш ва қоплама қўйиш жараёни алоҳида технологик операциялар режимида ҳам, бир технологик циклда ҳам амалга оширилади. Ишлаб чиқилган технологик концепция ва уни амалга ошириш қурилмалари вакуумланган ҳажмни камайтиради, электр энергиясини тежашни



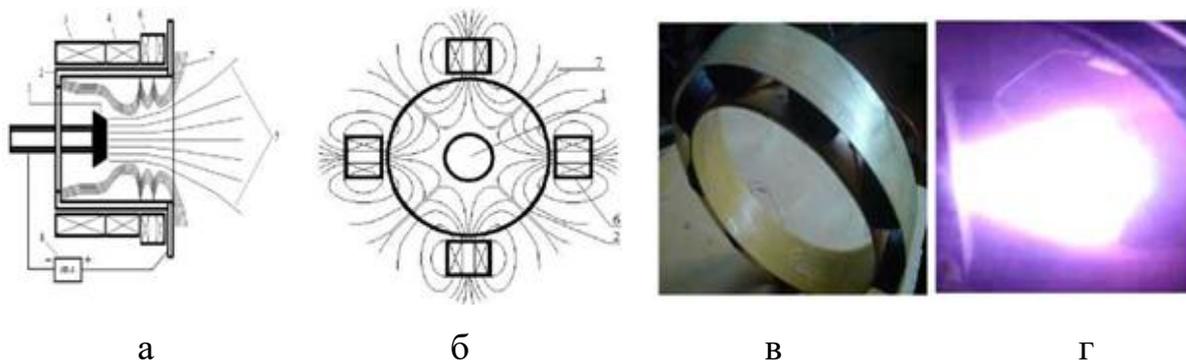
10-расм. Қувур ташки юзасига вакуумёйли технологиктаъсирни амалга ошириш техник тизими схемаси.

таъминлайди, катод нуқталарининг кўчишини бошқариш шартларини яратади.

Биз томонидан яратилган ва қўлланилган, янгиликка эга ва ЎзР патенти билан ҳимояланган техник тизимда Вакуум ёйли разряд орқали генерация қилинган ион-плазма оқимида зарарланган ҳиссачалар (ионлар ва электронлар) тақсимоти

параметрларини бошқариш қопламаларни махсулот юзасига тушириш жараёнини оптимизация қилиш, қўйилаётган қопламанинг бир текислиги, бутунлиги ва адгезиясига эришиш учун муҳим вазифа саналади.

11-расмда техник қурилма схемаси келтирилган, унда мультиполь магнит майдони плазма манбаи корпусининг ташки юзасида жойлашган электр магнит катушкалар орқали шакллантирилади, уларнинг ўқлари плазма оқими ўқига перпендикуляр бўлган текисликда симметрик жойлашган ва битта нуқтада кесишган.



11-расм. Кўндаланг (радиал), мультиполь магнит майдонли вакуум-ёйли плазма манбаси (ВЁПМ) қурилмаси: ВЁПМ схемаси – а, магнит чизикларининг кўндаланг кесими схемаси – б, магнитлар тизими – в, плазма оқими фотосурати-г.

Вакуум ёйли плазма манбаи қурилмаси металл катод – 1 ни ўз ичига олади, у анод – 2 бўлган корпусда коаксиал жойлашган, стабиллаштирувчи – 3 ва фокусловчи – 4 магнит чўлғам манба корпусида жойлашган, ҳамда биз томонидан ишлаб чиқилган плазма оқими параметрларини бошқариш магнит тизими, Вакуум ёйли манба корпусида жойлашган магнит чўлғамлар – 5 ни ўз ичига олади, уларнинг ўқлари битта текисликда симметрик жойлашган, радиал, мультиполь магнит майдонини шакллантиради, куч чизиклари конфигурацияси – 6 билан плазма оқимидаги ион компонентининг фазовий тақсимотини бошқаради, ионларини оқимнинг марказий ўқ қисмидан периферия соҳасига кўчиради. Бу орқали оқимда ионларнинг керакли тақсимоти ва ионлар зичлиги шакллантирилади. Радиал мультиполь магнит

майдони кучланишининг миқдорини ўзгартириб, биз мураккаб шаклли металл маҳсулотнинг ишлов берилаётган юзасига самарали таъсир қилиш ва қоплама қўйиш учун зарур плазма оқими параметрларини яратамиз.

ХУЛОСАЛАР

Диссертацияда олинган экспериментал ва назарий маълумотлар ва уларни батафсил таҳлил қилиш қуйидаги хулосалар чиқаришга имкон беради:

1. Илк бор, ҳисоблаш тадқиқоти орқали вакуум ёйи разряднинг катод доғларида F-эмиссиясига асосланган жараёнларни амалга ошириш шартлари аниқланди. Учта шарт бажарилиши зарурлиги аниқланди: биринчидан, оптимал электр майдони ($E_{\text{опт}}$) шаклланиши керак; иккинчидан, $E_{\text{опт}}$ майдонини яратувчи атом-ион баланси бажарилиши керак; учинчидан, катод температураси Ноттингам эффекти инверсия температурасидан ошмаслиги лозим. Катод атомининг буғланиш иссиқлиги ушбу талабларга жавоб берганда $\lambda_a \sim 1.1 - 1.2$ эВ дан ошмаслиги аниқланди.

2. Катод доғи тузилиши ва параметрлари аниқланди: Автоэлектрон эмиссияли, электр майдон кучи $E = (1-6) \times 10^7$ В/см⁻¹, ҳарорат $T_n = (12.5) \times 10^3$ К, ток зичлиги $j_n = (0.15-3) \times 10^7$ А/см², катод нуктаси диаметри $d_n = 0.3-1$ мкм. Бунда $d_n = 0.5-1$ мкм чиқиш иши қийматлари $\phi < 2$ эВ га эга катодларга хос, $d_n = 0.3-0.5$ мкм эса $\phi = 4-4.5$ эВ га эга катодларга хосдир.

3. Экспериментал равишда аниқландики, металл юзани вакуум ёйи разряди билан тозалашда оптимал шартлар: анод юзаси катод геометриясини такрорлаши ва электродлар ўртасидаги масофа 20–35 мм бўлиши керак; бунда юзага яқин қатламда икки қатламли модификацияланган зона шаклланади, у тўқ рангли углероддан тозаланган ташқи қатлам (қалинлиги 1 мкм гача) ва “оқ қатлам” (10–12 мкм гача) дан иборат бўлиб, унинг микроқаттиқлиги 1.4–1.5 мартага ошади, яъни катод юзаси ифлосланишлардан тозаланиб, бир вақтда мустаҳкамланади. Ишчи ҳажмда қолдиқ муҳит босими камайганда ва ёй разряд токи ортганда ишлов берилган юза ғадир будирлик ошади.

4. Ишлов берилаётган пўлат юзага электронлар чиқиш ишини пасайтирувчи моддалар (KOH ва NaOH) 20% гача эритмаси қўлланилса, вакуум-ёйи тозалашда солиштирма энергия сарфи 1.5–2.4 мартага камаяди, 10% МЮА концентрациясида юза қўполлиги 2.5 мартага камаяди ва тозалаш тезлиги 1.8 мартага ошади. Элементар катод доғлари пайдо бўлиш эҳтимоли экстремуми билан юза ғадир будирлиги ва тозалаш тезлиги параметрлари ўртасида МЮА концентрациясига қараб корреляция аниқланди, бу ўзгаришлар катод нукталари пайдо бўлиш эҳтимолининг ўзгариши билан шартланганини кўрсатади. Катод нуктасининг юзада шаклланиш эҳтимоли 0.001 г/см² МЮА юза концентрациясида максимал қийматга етади.

5. Биринчи марта вольфрам оксидидан техник углерод ва глюкоза боғловчилари билан анодда жойлашган вольфрам карбиди нанокукунларини вакуум ёйли синтез қилиш жараёни амалга оширилди, бу графит катоднинг плазма оқими таъсири билан юз берди. 100–200 нм ўлчамли, гексагонал

кристалл тузилишга эга вольфрам монокарбиди (WC) нанокукунлари олинди.

6. Биринчи марта вакуум ёйли тозалаш ва металл юзага махсус пўлатлардан (зангламайдиган пўлат) химоя қопламалари қўйиш жараёнлари бир технологик циклда бирлаштирилганда, қўйилаётган материал (зангламайдиган пўлат) хусусиятлари сақланиб, ишлов берилаётган юзанинг юқори эксплуатацион хусусиятлари шаклланиши кўрсатилди. Анодда ажралган иссиқлик энергияси ёйли разряд энергиясининг 71%–75% ни, катодда эса 12–13% ни ташкил қилиши аниқланди. Металл юзани вакуум-ёйи билан тозалаш юза заряд зичлиги $(112-115) \times 10^4$ Кл/м² да амалга оширилади, махсулотни 1 К даражага қиздириш эса (8.7–9.4) Кл/м² ни ташкил қилади.

7. Вакуум-ёй разрядини бошлаш қурилмаси конструкцияси яратилди, у керамик қувурга асосланиб, учида графит ва кумуш аралашмаси билан тўлдирилган разряловчи иборат бўлиб, плазма импульси самарадорлигини (электронлар ва ионлар эмиссиясини) оширувчи турли қўшимчалар билан жиҳозланган.

8. Қувур ташқи юзасини вакуум-ёйли тозалаш ва қоплама қўйиш учун коаксиал технологик тизим ишлаб чиқилди, бу вакуумланган ҳажмда амалга оширилади, қувур ташқи юзаси ва корпус ички юзаси билан шакллантирилади, улар вакуум тизимининг технологик қисми разряд тизими элементларидир, ЎзР.патенти билан ҳимояланган (№ IAP05071, 17.04.2012 й.).

9. Металл қувурсимон материалларнинг ташқи юзасини вакуум-ёйли тозалаш, ишлов бериш ва қоплама қўйиш учун коаксиал сканерловчи технологик тизим ишлаб чиқилди, бу қувур ташқи юзасида коаксиал жойлашган электр разряд блоги орқали, ишлов берилаётган юза бўйлаб ҳаракатланиб амалга оширилади, ЎзР. патенти билан ҳимояланган (№ IAP 205116, 31.07.2012 й.).

10. Биринчи марта вакуум-ёйли манбадан генерация қилинган плазма оқимида ионларнинг фазовий тақсимотини бошқаришнинг физик асослари ва техник тизим ишлаб чиқилди, мультиполь магнит майдони манба корпусида жойлашган электр магнит чўлғамлар орқали яратилади, уларнинг ўқлари плазма оқими ўқиға перпендикуляр текисликда симметрик жойлашиб, битта нуқтада кесишган, қоплама қўйиш жараёнининг самарадорлигини таъминлайди, ЎзР. патенти билан ҳимояланган (№ IAP06630, 20.04.2019 й.).

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ
DSc.02/30.12.2019. FM/T.65.01 ПРИ ИНСТИТУТЕ
ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

ИНСТИТУТ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

АРУСТАМОВ ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КАТОДНОМ ПЯТНЕ ВАКУУМНОГО
ДУГОВОГО РАЗРЯДА И ВАКУУМНО-ДУГОВЫЕ МЕТОДЫ
ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ ПОВЕРХНОСТЬ**

01.04.04 – Физическая электроника

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ
ДОКТОРА (DSc) ФИЗИКО –МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК**

ТАШКЕНТ–2025

Тема докторской (DSc) диссертации зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан под номером В.2024.1.DSc/FM260.

Диссертация выполнена в Институте ионно-плазменных и лазерных технологий им. У.А.Арифова АН РУз.

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

Научный консультант:

Ашуров Хатам Бахромович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Кремков Михаил Витальевич
доктор физико-математических наук, профессор

Максимов Сергей Евлантиевич
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник.

Ташатов Алланазар Каршиевич
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация:

Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова

Защита диссертации состоится «7» октября 2025 г. в 14:30 часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM/T.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 ионноплазменных и лазерных технологий (зарегистрирована за № 13). Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 33. Тел.: (99871) 262-31-69).

Автореферат диссертации разослан «24» сентябрь 2025 года.
(реестр протокола рассылки от «24» сентября 2025 года).




Х.Б. Ашуров
председатель Научного совета по присуждению учёных степеней, доктор технических наук, профессор.


И.Д. Ядгаров
учёный секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней, доктор физико-математических наук, профессор.


У.К. Махманов
председатель Научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней, доктор физико-математических наук, профессор.

ВВЕДЕНИЕ (аннотация докторской (DSc) диссертации)

Актуальность и востребованность темы диссертации. В последнее время развитие мировой экономики в инновационном направлении и обеспечение стабильного роста отраслей требует энергосбережения и рационального использования ресурсов, получения возобновляемых и высококачественных по функциональным параметрам покрытий и тонкоплёночных слоёв, разработки электрофизических установок и приборов, а также технологий формирования многокомпонентных покрытий и структур для микроэлектроники, полупроводниковой, вакуумной, электронной, радиационной, ядерной и космической техники. Разработка и внедрения современных технологий, повышающих прочностные, защитные, антикоррозионные и другие эксплуатационные свойства рабочей поверхности изделий, создание нанокompозитных материалов является важной актуальной задачей современной науки и техники.

В решении этих задач в мире решающую роль играют наиболее перспективные вакуумные, ионно-плазменные методы физического осаждения (PVD), в частности технологии, основанные на вакуумном дуговом разряде (ВДР). Все это привело к новому витку исследований физических и технологических основ ВДР, разработке новых подходов к развитию технологий модификации свойств металлической поверхности, нанесения покрытий, синтеза и получения наноструктурированных материалов.

Динамично развивающиеся в Узбекистане машино- и автомобилестроение, химическая промышленность и др., а также добывающие сектора экономики, достижение высокого качества и эксплуатационной надежности машин и механизмов, а также возможность локализации их производства, более низкой стоимости, замещения валютного импорта связывают с освоением новых наукоемких технологий.

Данное диссертационное исследование выполнено в соответствии приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан ППИ-3 «Энергетика, энерго-ресурсосбережение, транспорт, машино- и приборостроение» и непосредственно связано с реализацией задач направленных на повышение срока службы изделий, придания поверхности изделий высоких функциональных свойств, получения новых материалов.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Данное диссертационное исследование служит в определенной степени реализации задач, определенных в постановлениях и других нормативных правовых документах, связанных с повышением энерго-ресурсосбережения и непосредственно связано с задачами, предусмотренными в Указах Президента Республики Узбекистан №УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 года, №УП-2789 от 17 февраля 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-

исследовательских работ», №УП-4422 от 22 августа 2019 года “Об оперативных мерах по повышению энергоэффективности хозяйственной и специальной сфер, внедрению технологии энергосбережения и развития возобновляемых источников энергии”, а также №УП-60 от 28 января 2022 года «О стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы.

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации.

Исследования по физическим основам вакуумного дугового разряда, ионно-плазменным, дуговым-разрядным технологии интенсивно проводятся на протяжении последних десятилетий в университетах и научных учреждениях, в том числе в национальной лаборатории Лоренса Беркли, Калифорния, США, Научно-исследовательской лаборатории General Electric, Department of Physics, University of California, Los Angeles, США, School of Electrical Engineering, Tel Aviv University Israel, ФТИ, Харьков, Украина, ИСЭ СО РАН, Объединенном институте высоких температур РАН, Институте ядерной физики СО РАН и в ряде других научных центрах мира и продолжают по настоящее время.

Библиография работ по вакуумным разрядам, составленная Миллером в 1990 году, по вакуумным разрядам 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.

Важные экспериментальные результаты получены в институтах учеными ИСЭ СО РАН и ИЭФ УрО РАН, а также Даалдером (Голландия), Кимблином (США), Ютнером (ФРГ), Кесаевым (СССР), Танбергом (США). Выводы, к которым они пришли, состоят в том, что вся физика катодного пятна находится и осуществляется в одной ячейке и проходит за один цикл. Из этой ячейки испускаются ионы, которые со скоростью 10^6 см/сек летят в сторону анода. Полученные результаты о физических процессах в вакуумно -дуговом разряде стали основой для создания многообразных вакуумных, разрядных и плазменных устройств и технологий. И в настоящее время активное исследование в этом направлении направленно на развитие технологических приложений в том синтеза наночастиц, наноструктурированных материалов (карбида вольфрама и др.). К настоящему времени ряд актуальных задач в этой области решены, в частности современное состояние теории вакуумной дуги изучалось Г.Эккером. Катодные явления изучались Л. Харрисом.

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 взрывная эмиссия в катодном пятне – это процесс

порционный, обусловленный взрывами струй жидкого металла, что объясняло огромные электронные токи эмиссии электронов. Результаты получены: И.Г. Кесаевым, Г.А. Месяцем, М.А. Яландиным, В.М. Куляпиным, А.Н. Серьезновым, М.Ф. Жуковым, А.С. Коротеевым, и другими.

Степень изученности проблемы. Изучение процессов, происходящих в уникальных катодных привязках - катодных пятнах вакуумного дугового разряда, а также характера их воздействия на металлическую поверхность катода представляется весьма важным, как для развития теоретических представлений о процессах в катодных пятнах, воздействии вакуумного дугового разряда на поверхность материала, так и для развития и создания новых технологий обработки и получения новых наноматериалов.

Одним из центральных вопросов физики дугового разряда в вакууме является механизм эмиссии электронов, с которым тесно связаны и различные технические применения этого вида разряда, источника заряженных частиц, плазменных потоков, а также обработки металлической поверхности, нанесения покрытий и получения новых материалов.

Основное внимание было направлено на исследования вакуумного дугового разряда с катодными микропятнами на "холодном катоде", что является одним из направлений исследований физической электроники. В зоне их воздействия на поверхность катода, температура достигает высоких значений, формируются эрозионные плазменные струи, выбрасываемые в межэлектродный промежуток и играющие основополагающую роль в реализации разряда и его практического применения. В настоящее время преобладает точка зрения, что элементарные процессы, происходящие в КП в процессе их горения, это не что иное, как акты взрывной эмиссии на микроскопических неровностях поверхности электродов.

Поэтому следует ожидать, что существует прямая связь между свойствами КП, материалом катода и состоянием его поверхности. Вместе с тем, не было обращено внимание на изучение процессов вакуумного дугового разряда, определяющих генерацию плазменного образования в катодном пятне, воздействия плазмы на поверхность катода, а именно условий эмиссии электронов, а также управления процессом формирования свойств приповерхностного слоя, реализации процессов формирования и синтеза новых материалов.

В Узбекистане изучение процессов в катодных пятнах вакуумного дугового разряда, их воздействия на металлическую поверхность проводилось в Институте ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А. Арифова (бывший Институт электроники) АН РУз, начиная с середины прошлого столетия. Проводимые работы были направлены на изучение фундаментальных основ вакуумного дугового разряда, взаимодействия вакуумной дуговой разрядной плазмы с металлической поверхностью, и решения практических задач. В Институте электроники АН РУз. в 1970-1990-ые годы (Арифовым У.А., Эстерлисом М.Х., Нагайбековым Р.Б.) были развиты исследования по изучению свойств катодного пятна вакуумной дуги,

характера вакуумного дугового разрядного воздействия на металлическую поверхность катода, разработке метода обработки, очистки и нанесения покрытий на изделия различной геометрии. В дальнейшем эти исследования были продолжены Ашуровым Х.Б., Пожаровым С.Л., Булатом В.Е., Миркаримовым А.М. и др. В настоящее время в центре внимания находятся как генерационные процессы в катодном пятне вакуумной дуги, так и характер воздействия катодной плазмы на поверхностный слой обрабатываемой поверхности, разработка методов, технологий обработки металлических изделий в одном технологическом цикле, а также получения и синтеза новых материалов.

Связь темы диссертации с планами научно-исследовательских работ организации, где выполнялась работа. Исследования, рассматриваемые в диссертации, выполнены по плану научно-исследовательских работ Института ионно-плазменных и лазерных технологий им. У.А. Арифова АН РУз в рамках следующих проектов: - ФА- А15-Ф129, 2010-2011гг., «Разработка технологии нанесения многофункциональных защитных покрытий на внутренние поверхности труб диаметром до 500 мм. вакуумно-дуговым методом»; - АЗ-ФА-Ф173. (2012-2014гг), «Разработка разрядной системы вакуумно-дугового источника плазмы для обработки поверхности изделий и нанесения на них защитных покрытий»; - ФА-ФИ-Ф026. (2014-2015гг.). «Разработка разрядной системы вакуумно-дугового источника плазмы для обработки поверхности изделий и нанесения на них защитных покрытий», - ФА-АЗ- 062. (2015-2018гг.) «Разработка технологии ионно-плазменного осаждения, покрытый в условиях ионной бомбардировки и синтеза в реактивном газе»; Программа научно-исследовательской работы «Разработка вакуумно-дугового источника» (2020г.).

Целью диссертационного исследования являлось аналитическое определение условий реализации процессов в катодных пятнах вакуумного дугового разряда на основе автоэлектронной эмиссии и характеристик катодного пятна, определение влияния воздействия катодной плазмы на свойства приповерхностного слоя материала электрода и формирование методов получения наночастиц карбида вольфрама, вакуумно-дуговой обработки металлической поверхности изделий различной геометрии.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи исследования:

аналитически исследовать условия реализации процессов в катодном пятне вакуумного дугового разряда на основе F-эмиссии электронов, и характеристики катодного пятна;

исследовать влияние процесса вакуумно-дуговой обработки, очистки металлической поверхности на микроструктуру, фазовый состав поверхностного слоя;

экспериментально изучить влияние нанесенных на обрабатываемую стальную поверхность веществ с низкой работой выхода на вероятность

образования катодных пятен, параметры процесса очистки поверхностного слоя;

изучить условия формирования комплексного процесса вакуумно-дуговой очистки металлической поверхности и последующего нанесения покрытий в едином технологическом цикле;

исследовать процесс синтеза порошков карбида вольфрама в процессе генерации вакуумным дуговым разрядом, плазменного потока оксида вольфрама и разработать технические условия, его реализации;

разработать технологическую основу реализации процесса вакуумной дуговой очистки внешней поверхности трубчатых изделий и нанесения покрытий на обрабатываемую поверхность в одном технологическом цикле, для придания ей высоких эксплуатационных свойств;

разработать метод управления заряженной компонентой плазменного потока, генерируемого коаксиальным вакуумно-дуговым источником магнитным полем, повышающим эффективность и качество активации, им обрабатываемой поверхности изделия и нанесения на неё покрытий.

Объектом исследования являются условия реализации катодных пятен вакуумно-дугового разряда на основе автоэмиссии электронов и особенности их воздействия на свойства металлической поверхности, в том числе на поверхность с нанесенным слоем поверхностно активных веществ, а также процесса синтеза нанопорошков карбида вольфрама при генерации плазменного потока.

Предметом исследований являются процессы в катодном пятне вакуумного дугового разряда в условиях автоэлектронной эмиссии, а также ионно-плазменного воздействия вакуумной дуги на металлическую поверхность, в том числе с нанесенным на неё слоем поверхностно активного вещества, разработка эффективных технологических методов очистки обрабатываемой поверхности, в том числе цилиндрических металлических изделий, и синтеза нанопорошков.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы применены следующие методы исследования: математическое моделирование для нестационарных процессов; экспериментальные высокочувствительные аналитические методы; рентгеноструктурный анализ и профилометрия для исследования структуры, шероховатости поверхности с использованием профилометра Mitutoyo SurfTest 401.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые, в рамках аналитических исследований процессов в катодном пятне вакуумной дуги определено, что вакуумная дуга с F- типом эмиссии электронов реализуется при теплоте испарения атома материала катода, не превышающей $\lambda_a \sim 1.1 - 1.2$ эВ; определены структура и характеристики катодных пятен;

установлено, что при очистке металлической поверхности вакуумной дугой оптимальны, поверхность анода, повторяющая геометрию катода и межэлектродное расстояние 20-35 мм, при этом в приповерхностном слое

формируется двухслойная зона из внешнего обезуглероженного слоя толщиной до 1 мкм и “белого слоя” до 10–12 мкм, микротвёрдость которого возрастает в 1,4-1,5 раза и составляет 681 кгс/мм²;

впервые определено, что скорость очистки вакуумным дуговым разрядом стальной поверхности при нанесении КОН и NaOH с концентрацией 10-15%, возрастает в 1,8 раза, а шероховатость обработанной поверхности уменьшается в 2,5 раза, что коррелирует с установленным экстремумом вероятности формирования элементарных катодных пятен при поверхностной концентрации 0,001г/см² поверхностно-активных веществ (ПАВ) и определяет возможность подбором концентрации ПАВ получать требуемые параметры обработки и свойства поверхности;

установлено, что в плазме вакуумного дугового разряда с вольфрамовым электродом, содержащим прекурсор с техническим углеродом и глюкозой, осуществляется синтез порошков карбида вольфрама размером в диапазоне 100–200 нм. Разработана и создана электродная система реализации процесса вакуумно-дугового синтеза нанопорошков карбида вольфрама и техническое решение, защищенная патентом РУз, обоснован и реализован комплексный процесс очистки обрабатываемой металлической поверхности и последующего нанесения покрытий вакуумным дуговым разрядом, показано, что осуществление этих процессов в едином технологическом цикле обеспечивают формирование высоких эксплуатационных свойств обрабатываемой поверхности;

впервые разработана технологическая система вакуумно-дуговой очистки внешней поверхности трубы и нанесения покрытий, осуществляемое в вакуумированном объеме, формируемое внешней поверхностью трубы и внутренней поверхностью корпуса, которые являются элементами разрядной системы технологической части вакуумной системы, защищенная патентом (РУз № IAP 05071 17.04.2012г.);

впервые разработана сканирующая электроразрядная система вакуумного дугового воздействия на внешнюю поверхность металлического трубчатого изделия, модулями обработки и нанесения покрытия электроразрядным блоком, коаксиально размещенного на внешней поверхности трубчатого изделия, при его перемещении вдоль обрабатываемой поверхности, защищенная патентом (РУз № IAP 05116 31.07.2012г.);

впервые разработана система управления источника плазмы радиальным магнитным полем, разработана коаксиальная магнитная система управления параметрами плазменного потока, вакуумного дугового источника плазмы радиальным, мультипольным, магнитным полем, повышающая его эффективность и качество активации обрабатываемой поверхности изделия и нанесения на неё покрытий, защищенная патентом (РУз № IAP06630 от 20.04.2019г.).

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

впервые на основе полученных результатов построена модель процессов в катодных пятнах вакуумного дугового разряда с автоэлектронной эмиссией,

позволяющая реализовать генерацию однородного потока материала катода и тем самым качественную обработку металлической поверхности;

определены условия формирования оптимального технологического, в том числе комплексного, воздействия катодных пятен на поверхностный и приповерхностный слой металлического катода, для придания ему высоких эксплуатационных свойств;

впервые разработана основа метода, электродная система и техническое решение получения нанопорошка карбида вольфрама.

впервые разработана технологическая система вакуумно-дуговой очистки внешней поверхности трубы и нанесения покрытий, осуществляемых в вакуумированном объеме, формируемом внешней поверхностью трубы и внутренней поверхностью корпуса, которая защищена патентом (РУз № IAP 05071, 17.04.2012г.);

впервые определен способ и техническое решение реализации процесса очистки внешней поверхности цилиндрического изделия катодными пятнами вакуумной дуги сканирующим электроразрядным блоком которые защищены патентом (РУз № IAP 05116 31.07.2012г.);

впервые разработано техническое решение и способ управления параметрами плазменного потока, генерируемого катодными пятнами вакуумной дуги (РУз № IAP 06630 от 20.04.2019г.).

Достоверность результатов исследований обеспечивается и подтверждается использованием современных теоретических и экспериментальных методов, рентгеновского анализа и атомно-силовой электронной микроскопии, хорошим соответствием полученных результатов с данными других авторов, а также необходимой статистикой проведенных экспериментов.

Научная и практическая значимость результатов исследования заключается в результатах, полученных расчетным математическим исследованием генерационных процессов зарядовых компонент в катодном пятне, определяющих условия его реализации на основе автоэлектронной эмиссии. Сформированные модельные основы дугового разряда в режиме реализации F- эмиссии электронов катодного пятна расширяют понимание физико-химических процессов, протекающих в поверхностном и приповерхностном слое катода в области реализации катодного пятна.

Полученные результаты экспериментальных исследований особенностей воздействия катодных пятен на поверхность электрода и влияния на свойства поверхностного и приповерхностного слоя представляют важную информацию для развития теоретических и практических исследований процессов, происходящих при взаимодействии катодной плазмы вакуумной дуги с металлической поверхностью.

Практическая значимость результатов исследования связана с возможностью разработки новых вакуумно-дуговых электроразрядных устройств, а также развития способов и методов обработки и очистки поверхности изделий от различного рода загрязнений, для решения

актуальных задач по эффективной модификации свойств поверхности обрабатываемого металлического изделия, придания ей необходимых высоко востребованных эксплуатационных свойств, а также получения новых наноструктурных материалов.

Большое практическое значение имеют разработанные новые технические решения и методы обработки поверхности изделий, нанесения на неё функциональных покрытий с контролируемыми физическими свойствами, обеспечивающими высокие функциональные и эксплуатационные свойства (получены 3 патента РУз).

Внедрение результатов исследования. На основе результатов комплексных аналитических и экспериментальных исследований воздействия катодных пятен вакуумного дугового разряда на внешнюю поверхность трубчатых изделий в вакуумированном пространстве:

на способ обработки внешней поверхности металлической трубы и устройство для его реализации получен патент Республики Узбекистан № IAP 05071, 17.04.2012г. где использовались результаты комплексных исследований формирования технологического воздействия КП вакуумного дугового разряда на металлическую поверхность. Данная задача была успешно решена благодаря разработке зоны вакуумированного технологического воздействия на обрабатываемую поверхность, формируемую внутренней поверхностью корпуса и внешней обрабатываемой поверхностью трубы, коаксиально размещенной в нем;

на способ электроразрядного воздействия на внешнюю поверхность цилиндрического полого изделия в вакууме и устройство его осуществления получен патент Республики Узбекистан № IAP 05116 31.07.2012г., где представлены возможности разработанных основ технологического воздействия катодных пятен вакуумного дугового разряда на металлическую поверхность изделий с применением коаксиальной электродной системой, в результате были установлены оптимальные условия реализации процесса комплексного осуществления процессов очистки обрабатываемой поверхности и нанесения на неё покрытий в одном технологическом цикле, что позволило оптимизировать технологический процесс, повысить его эффективность и функциональные параметры рабочей поверхности изделий;

на способ управления плазменным потоком вакуумного дугового источника получен патент Республики Узбекистан, № IAP 06630, 17.11.2019г. где определены физические основы управления плазменным потоком вакуумного дугового источника плазмы, В результате установлен метод формирования поперечного плазменному потоку радиального, мультипольного магнитного поля, создаваемого размещенными на корпусе источника плазмы электрическими магнитными катушками, оси которых расположены в одной, перпендикулярной потоку, плоскости, формирующего оптимальное пространственное распределения ионов в нем, для осуществления эффективных процессов очистки, активации и нанесения покрытий на обрабатываемую поверхность изделия.

Апробация результатов исследования. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 26 международных научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов. Полученные по теме диссертации результаты изложены в 40 научных трудах, из которых 14 статей в научных журналах, в том числе 8 статей в базе Scopus, 3 в республиканских журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, 26 тезисов в международных научных конференциях, 3 патентов РУз.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Диссертация содержит 165 страниц текста, включая 47 рисунков и 6 таблиц и список цитируемой литературы из 143 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во Введении обоснована актуальность и востребованность исследований по теме диссертационной работы, сформулированы цель и задачи диссертации, определены объекты, предметы и методы исследований, а также связь диссертационных исследований с приоритетными направлениями развития науки и технологий в Республике Узбекистан. Изложена научная новизна исследований, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены данные о внедрении результатов, их апробации, а также сведения об объёме и структуре диссертации.

В первой Главе «Физические особенности вакуумного дугового разряда и его технологического воздействия на металлическую поверхность (Обзор литературы)» приведён обзор литературных данных по теме исследований. Анализ экспериментальных и теоретических работ по изучению вакуумно-дугового разряда, генерации катодной плазмы и её воздействия на металлическую поверхность, показал, что в настоящее время большое внимание уделяется изучению эмиссионных процессов в катодном пятне, влиянию параметров вакуумно-дугового разряда на структурные изменения, поверхности металлического катода вследствие температурного воздействия катодных пятен. Это связано с перспективами получения сверхчистых металлов, создания интенсивных потоков «металлической» плазмы для получения различных покрытий, сильноточных пучков заряженных частиц и коммутационной техники.

На основании проведенного анализа определено, что для формирования эффективных методов воздействия на поверхность обрабатываемой детали, придания её высоких эксплуатационных свойств, получения новых материалов необходимо изучение, как генерационных процессов в катодном пятне вакуумной дуги, так и его воздействия на обрабатываемую

металлическую поверхность. Недостаточно полно изученные указанные научно-технические проблемы послужили основой для определения целей и задач диссертационной работы.

Во второй Главе «Методы исследования и экспериментальная вакуумная установка» описаны методы исследования, вакуумные установки и электродные системы, разработанные для проведения экспериментов по реализации вакуумного дугового разряда, его воздействия на металлическую поверхность. Экспериментальные исследования проводились на установке вакуумный универсальный пост (ВУП), вакуумных технологических установках, разработанных и изготовленных в Лаборатории ионно-плазменных технологий Института Ионно-плазменных и лазерных технологий им. У.А.Арифова АН РУз.

Дано краткое описание сконструированных многоцелевых вакуумных установок и основных их элементов. Для выполнения поставленных в работе задач необходимо было провести технологическую обработку катодными пятнами вакуумной дуги образцов металлического 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 катода, изучение их физических свойств). Полученные результаты анализировались с помощью тестера шероховатости Mitutoyo SurfTest SJ 401, Твердометра ПМТ-3, дифрактометра ДРОН-2, микроскопа МИМ-8М.

Эти методы и аналитические приборы в совокупности позволили обеспечить: исследование шероховатости обработанной поверхности металлического образца и твердости его приповерхностной области; проведение анализа структурных изменений приповерхностном слое металла после температурного воздействия.

Разработанные в работе методы, новые способы и устройства вакуумно-дуговой ионно-плазменной технологии были практически реализованы и защищены патентами Республики Узбекистан.

В третьей главе «Исследование условий существования катодных пятен дугового разряда в вакууме с автоэлектронной эмиссией» проведено аналитическое исследование условий реализации процессов в катодном пятне вакуумного дугового разряда на основе F-эмиссии электронов, взаимосвязи свойств материала катода, теплоты испарения атома, атомного веса, работы выхода электрона с параметрами катодного пятна вакуумного дугового разряда. На основании полученных результатов созданы эффективные методы технологического воздействия на свойства металлической поверхности, модификации её свойств, формирования ионно-плазменных потоков с необходимыми характеристиками.

Автоэлектронная эмиссия из катода в дуговом разряде в вакууме определяется наличием у его поверхности сильного электрического поля, которое создается объемным зарядом положительных ионов, удалённым от катода на расстояние порядка длины свободного пробега этих ионов (10^{-6} –

10^{-4} см). Электрическое поле, существующее у поверхности катода, для любой заданной плотности тока электронов и положительных ионов и для данного катодного падения потенциала можно определить с помощью уравнения Пуассона, представленного следующей формулой:

$$\frac{d^2U}{dx^2} = -4\pi\rho \text{ или } \frac{d^2U}{dx^2} = -4\pi \left(\frac{j_i}{v_1} - \frac{j_e}{v_2} \right) \quad (1)$$

где j_i , и j_e соответственно плотности тока ионов и электронов, v_1 - поступательная скорость ионов. Решение этого уравнения показывает, что процессы в катодном пятне формируются в областях размером в пределах одной длины свободного пробега электронов. Тогда и j_i , и j_e постоянны и не зависят от x . Более того, скорости v_1 v_2 внутри катодного пятна определяются следующими уравнениями

$$\frac{1}{2} m_i v_1^2 = Ue \text{ и } \frac{1}{2} m_e v_2^2 = (U_c - U) e \quad (2)$$

где m_i — масса положительного иона, m_e — масса электрона, U_c — потенциал катода. Подставив в уравнение (1) значения v и U из уравнения (2), получаем:

$$\frac{d^2U}{dx^2} = -4\pi \left[j_i \sqrt{\frac{m_i}{2Ue}} - j_e \sqrt{\frac{m_e}{2e(U_c-U)}} \right] \quad (3)$$

Это уравнение может быть интегрировано один раз и дает значение для напряженности электрического поля E_c :

$$E_c^2 = \left(\frac{dU}{dx} \right) = 16\pi \left[j_i \sqrt{\frac{m_i U}{2e}} + j_e \sqrt{\frac{m_e (U_c - U)}{2e}} - j_e \sqrt{\frac{m_e U_c}{2e}} \right] \quad (4)$$

когда предполагается граничное условие $dU/dx = E = 0$, $x = 0$. Это выражение не интегрируется в простую функцию и проще приступить к его графической интеграции. С этой целью уравнение (4) можно переписать в виде

$$E_c^2 = 7.57 \times \left[j_i \sqrt{1845AU} - j_e [\sqrt{U_c} - \sqrt{U_c - U}] \right] \quad (4a)$$

Отсюда для формирования электрического поля E_c необходимая плотность тока ионов, определяемая следующим выражением:

$$j_i = \frac{3.07 \times 10^{-8} \cdot E_c^2}{U_c^{0.5} \cdot A_c^{0.5}}, \text{ А см}^{-2} \quad (5)$$

где U_c – в В; j_i и j_e - соответственно, плотности тока ионов и электронов в $\text{А} \cdot \text{см}^{-2}$.

На рис.1 представлены графики зависимости $\lg j_e = f(E_c)$, (кривые 1 - 4) для катодов, отличающихся значениями работы выхода электронов.

$$\frac{j_e}{j_i} = \frac{50.5 U_c^{0.5} A_c^{0.5}}{\varphi} \exp \left(\frac{6.85 \times 10^7 \varphi^{1.5} \theta(y)}{E_c} \right) \quad (6)$$

Как следует из (6), зависимость отношения j_e / j_i от величин φ и E_c очень сильная. Однако в силу ряда причин она должна быть ограничена.

Во-первых, как показали эксперименты, доля тока ионов вакуумных дуг довольно высока (в среднем $\alpha \approx 8\%$) и практически не зависит от тепло- и электрофизических характеристик катода и тока дуги ($I_d < 1 \text{ кА}$). Это обусловлено требованием квазинейтральности потока катодной плазмы, истекающей из КП со скоростью $v_{\text{п}} \approx 10^6 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ и заполняющей межэлектродное

пространство. Это является следствием более общего закона – минимума производства энтропии. Для отношения тока ионов к току электронов получено выражение $\alpha \approx \frac{2V_i}{\langle v_e \rangle}$ (здесь v_i – поступательная скорость ионов, $\langle v_e \rangle$ – тепловая скорость электронов).

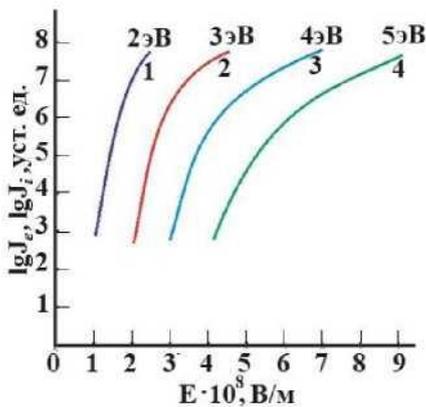


Рис.1. Зависимости $\lg j_e = f(E_c)$, кривые 1 – 4 для катодов, отличающихся значениями работы выхода электронов.

Во-вторых, при плотности тока $10^8 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ наблюдается отклонение наблюдаемых кривых от прямолинейной зависимости $\ln \frac{j_e}{E_c^2} = f\left(\frac{1}{E_c}\right)$.

В-третьих, при росте концентрации плазмы увеличивается вероятность трехчастичной рекомбинации ионов, что снижает значение плотности тока ионов на катод и, следовательно, величину электрического поля. Тогда (6) можно

свести к уравнению вида:

$$\frac{50.5 \cdot U_c^{0.5} \cdot A_c^{0.5}}{\varphi} \exp\left(-\frac{6.85 \times 10^7 \cdot \varphi^{1.5} \cdot \theta(y)}{E_c}\right) = 13.5. \quad (7)$$

После небольших преобразований и логарифмирования (7) получаем решение для оптимального значения $E_{\text{опт}}$ в виде:

$$E_{\text{опт}} = \frac{2.97 \times 10^7 \cdot \varphi^{1.5} \cdot \theta(y)}{0.57 + 0.5(\ln U_c + \ln A_c) - \ln \varphi} \text{ (В} \cdot \text{см}^{-1}\text{)}. \quad (8)$$

Выражение (8) определяет оптимальное значение электрического поля, при котором функционирование КП с F-типом эмиссии электронов оказывается наиболее вероятным. Как следует из (8), $E_{\text{опт}}$ зависит от ряда параметров катода и катодного пятна, причем наиболее важное значение имеет работа выхода электронов. Подставив экспериментальные данные U_c и табличные значения φ , A_c , функции Нордгейма $\theta(y)$, определим $E_{\text{опт}}$. Например, для катода с $\varphi = 4$ эВ и $A_c = 10^2$ при среднем $U_c = 15$ В получаем для напряженности электрического поля величину $E_{\text{опт}} = 6.45 \times 10^7 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$. Выполнение (8) является необходимым, но не достаточным условием существования КП с F-типом эмиссии электронов.

Атомно-ионный баланс в катодном пятне.

Вторым необходимым условием реализации электрического поля $E_{\text{опт}}$, обеспечивающим достаточную автоэлектронную эмиссию и дополняющим (8), является выполнение атомно-ионного баланса в КП. Образование положительных ионов в КП происходит в результате ударной ионизации электронами нейтральных частиц (атомов), испарившихся с поверхности катода. Таким образом, поток ионов (плотность тока ионов) на катод определяется интенсивностью испарения материала катода G_c , средней вероятностью ионизации атомов материала катода P_{ic} , зарядом иона и долей

возвращаемых на катод ионов β . Скорость испарения атомов с катода определяется формулой:

$$G = \rho_c \cdot v_3 \cdot \exp\left(-\frac{\lambda_a}{kT_c}\right), \quad (9)$$

где ρ_c - плотность материала катода, $\text{г}\cdot\text{см}^{-2}$; v_3 - средняя скорость звука $\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$, λ_a - теплота испарения атома катода и T_c - температура катода. Из (9) получаем выражение для плотности тока ионов, возвращаемых на катод в виде:

$$j_i = \frac{\beta \cdot g_i \cdot P_{ic} \cdot v_3}{N_a V_0} \exp\left(-\frac{\lambda_a}{kT_i}\right) (\text{А}\cdot\text{см}^{-2}) \quad (10)$$

где g_i - заряд иона, β - доля возвращаемых ионов на катод. С другой стороны, для формирования поля величиной $E_{\text{опт}}$ требуется плотность тока ионов на катод, определяемая выражением (6). Тогда из (6) и (10) следует уравнение атомно-ионного баланса в виде

$$\frac{\beta \cdot g_i \cdot P_{ic} \cdot v_3 \cdot N_a}{V_0} \exp\left(-\frac{\lambda_a}{kT_i}\right) = \frac{3.07 \times E_c^2}{U_c^{0.5} \cdot A_c^{0.5}}, \quad (11)$$

решение которого имеет вид $\frac{\lambda_c(\text{эВ})}{T_c(\text{К})} = \frac{\lg A - \lg B - 2 \lg E_{\text{опт}}}{5.05 \times 10^3}, \quad (12)$

где $A = \frac{\beta g_i P_{ic} v_3 N_a}{V_0}$ и $B = \frac{3.07 \cdot 10^{-8} E_c^2}{U_c^{0.5} A_c^{0.5}}$

Как следует из (12), отношение теплоты испарения атома катода к температуре пятна зависит от целого ряда параметров катода (φ , A_c , V_3 , V_0) и КП (U_c , P_i , β). Выполнение (12) является вторым необходимым условием реализации F-эмиссии в катодном пятне.

Теплота испарения атома катода и температура катодного пятна.

Как следует из (12), с ростом теплоты испарения атома пропорционально растёт температура катода, при которой формируется $E_{\text{опт}}$. Вместе с тем, с ростом температуры катода растёт и доля термически возбужденных электронов, часть которых поступает в прикатодную плазму. Следовательно, начиная с некоторой температуры происходит трансформация механизма F-эмиссии электронов в термоавтоэмиссию. Поэтому, определяя условия реализации катодного пятна с F-эмиссией, необходимо при определении условий ограничить величину теплоты испарения атома катода, то есть необходимо ввести физически обоснованный принцип - третье условие, пользуясь которым можно решить эту проблему. Таким принципом может служить эффект Ноттингама, согласно которому при некоторой температуре катода (называемой температурой инверсии) тепло Ноттингама меняет знак с положительного на отрицательный. Температура инверсии $T_{\text{ин}}$ определяется формулой:

$$T_{\text{ин}} = \frac{5.05 \times 10^{-5}}{\varphi^{0.5}} \quad (13)$$

(здесь E_c - в $\text{В}\cdot\text{см}^{-1}$, φ - в эВ, $T_{\text{ин}}$ - в К). При температуре инверсии энергия, теряемая катодом в результате эмиссии электронов с уровней, расположенных выше уровня Ферми, равна энергии, выделяющейся на катоде в результате эмиссии электронов, с уровней ниже уровня Ферми. В энергетическом аспекте

суммарный ток эмиссии соответствует “чистой” F - эмиссии (т.е. без калориметрического эффекта). Следовательно, при $T_c=T_{in}$ и $E_c=E_{opt}$ для теплоты испарения атома катода из (12) получаем итоговое выражение для λ_a , которое имеет вид $\lambda_a = \frac{T_{ин}(lgA-lgB-2lg E_{он})}{5.03 \cdot 10^3}$, далее подставив в него $T_{ин} = \frac{5,05 \cdot 10^{-5} \cdot E_c}{\varphi^{0,5}}$ в итоге получим окончательное выражение для λ_a

$$\lambda_a = \frac{1.12 \times 10^{-8} \cdot E_{opt}(lgA-lgB-2lg E_{opt})}{\varphi^{0,5}} \quad (14)$$

Отметим, что выражение (14), определяющее теплоту испарения атома, при котором имеет место F -эмиссия электронов в КП вакуумной дуги, является полным. Оно учитывает все три условия: во-первых, необходимость формирования E_{opt} , во-вторых, выполнение атомно-ионного баланса, при котором реализуется E_{opt} , в-третьих, ограничение температуры катода в пятне, следующее из эффекта Ноттингама. Так как $E_{opt} \sim \varphi^{3/2}$, то, согласно (11) $\lambda_a \sim \varphi$. Следовательно теплота испарения атома катода, при котором эмиссия электронов в катодном пятне осуществляется по F -механизму, зависит от целого ряда параметров катода (φ, A_c, v_s, V_0) и катодного пятна (U_c, ρ_c, β, g_i), но главное значение имеет работа выхода электрона. Расчеты теплоты испарения атома показали, что теплота испарения не превышает величины $\lambda_a=1.1 - 1.2$ эВ. С учетом возможности F -эмиссии, усиленной действием температуры (F - T -эмиссия), λ_a может быть на 15 - 20% выше. Однако, и в этом случае λ_a оказывается небольшой - $\lambda_a \leq 1.5 - 1.6$ эВ. Таким образом, можно констатировать, что F -эмиссия электронов в КП характерна для катодов со значением $\lambda_a \leq 1,5 - 1,6$ эВ. К этим веществам относятся металлы Zn, Cd и Hg. Большинство металлов имеют величины $\lambda_a > 2 - 2.5$ эВ, и для них характерна T - F -эмиссия электронов в катодном пятне вакуумного дугового разряда.

Структура катодного пятна вакуумной дуги.

Предположив, что рост тока пятна в КП происходит в результате деления каждого микропятна в среднем на две части через интервал времени τ_0 , то их число N_n и ток катодного пятна к моменту времени t будут::

$$N_n = N_0 \cdot 2^{\frac{t}{\tau_0}} \quad I_n = I_0 \cdot 2^{\frac{t}{\tau_0}} \quad (15)$$

где N_0 -начальное число ячеек (при $t = 0, N_0 = 1$).

Однако число ячеек и ток пятна не могут возрасти неограниченно. Ограничение роста количества ячеек и I_n обусловлено существованием равного расстояния между катодными микропятнами L_0 ($L_0 \cong 10^{-4}$ см), что объясняется балансом сил электростатического отталкивания и магнитного притяжения диполей микропятен. Сопротивление области стягивания тока определяется выражением $R = \frac{\rho}{d}$ (здесь ρ -удельное сопротивление, d -размер области подвода тока в область КП). После преобразований получим $\Delta U = \frac{\pi}{4} j d p(T)$. По мере прогрева поверхности катода в зоне микропятна даже для хороших проводников тока дополнительное падение потенциала достигает 0,1-0,5В. За время действия теплового источника длительностью $\sim 10-15$ нс

тепловая волна распространяется на расстояние $X \cong 10^{-4}$ см (т.е. $X \cong L_0$). Время существования микропятна $\tau \cong 15$ нс включает время его «оседлой» жизни τ_1 и время скачка τ_2 . Зная величины L_0 и τ_0 , оценим скорость перемещения микропятна (или скорость роста размеров КП) как $\vartheta_0 = \frac{L_0}{\tau_0}$, что для медного катода дает величину $\vartheta_0 \cong 7 \cdot 10^3$ см/с. В процессе деления микропятна скачкообразного разбегаются от первоначального центра (т.е. растет диаметр итогового катодного пятна), а среднее расстояние между этими пятнами уменьшается до L_0 . Отсюда для формирования КП можно записать формулу для L_0 в виде:

$$L_0 \cong \frac{\pi(\tau_0 + \vartheta_0 t)}{2^{\frac{t}{\tau_0} - 1}} \quad (16)$$

Решение (16) дает $t \cong 10^{-7}$ с, что и характеризует время формирования КП. В дальнейшем расширение катодного пятна резко замедляется, т.е. существование L_0 выполняет роль «стенки», ограничивающей рост размеров и величину тока пятна. Максимальный размер КП к моменту завершения его формирования будет $d_n = 2(\tau_0 + \vartheta_0 t) \cong 13 - 15$ мкм. Из (16) следует также связь диаметра катодного пятна с его током $I_n = \frac{2\pi d_n I_0}{L_0}$ т.е. $I_n \sim d_n$, а не d_n^2 .

Используя (15), получим, что число ячеек и ток пятна для медного катода составляют $N \cong 50 - 60$ и $I_n = (90 - 100)$ А. Если ток разряда превышает I_n , то начинают формироваться второе, третье и т.д. пятна. Средняя плотность тока в пределах пятна оказывается равной величине

$$j = \frac{4I_n}{\pi d_n^2} \cong 7 \cdot 10^7 \text{ А/см}^2 \quad (17)$$

Очевидно, что плотность тока в ячейках в 3-4 раза выше и соответствует взрывной эмиссии. С ростом температуры катода возможно уменьшение плотности тока, однако, по крайней мере для тугоплавких катодов она не может стать 10^8 А/см².

Параметры катодного пятна вакуумного дугового разряда.

Считая, что эмиссия электронов осуществляется по F типу, определим важнейшие параметры катодного пятна: напряженность электрического поля у поверхности катода (E), размеры катодного пятна, температуру поверхности в области воздействия катодного пятна (T). Согласно литературным данным, доля ионного тока вакуумных дуг $\alpha \approx 8 \times 10^{-2}$ и не зависит от материала катода и от тока дуги ($I_d \leq 1$ кА), уравнение токового баланса в КП принимает вид

$$\frac{1.54 \times 10^{-6}}{\varphi t^2(\psi)} \exp \left[-\frac{6.83 \times 10^7 \varphi^{\frac{3}{2}} \vartheta(\psi)}{E_c} \right] = \frac{3.07 \times 10^{-7}}{U_c^{0.5} A^{0.5}}. \quad (18)$$

Правая часть (18) зависит от U_c и A , которые известны достаточно точно, левая часть (18) представляет собой зависимость $\frac{j_e}{E^2} = f(E)$. Путем решения (18) определим необходимую для существования КП с F типом эмиссии напряженность электрического поля. Результаты решения приведены в

таблице 1. В зависимости от параметров катода электрическое поле в пятне составляет $E = (1-6)10^7$ В*см⁻¹. Согласно (18) необходимая плотность тока ионов при F-эмиссии определяется следующим выражением:

$$j_i = \frac{3.07 \times 10^{-8} \cdot E_c^2}{U_c^{0.5} \cdot A_c^{0.5}} \quad (\text{А см}^{-2}) \quad (19)$$

Поток ионов на катод определяется интенсивностью испарения ν_a , атомов с катода, вероятностью P_i ионизации атомов и долей возвращаемых на катод ионов β . Поток испаренных атомов зависит от температуры пятна и теплофизических свойств катода в соответствии с выражением:

$$\nu_a = \frac{10^{C-0.5 \lg T - \frac{B}{T}}}{m_a} \quad (20)$$

(здесь С и В – константы испарения Дешмана). Следовательно, плотность тока иона будет

$$j_i = \frac{\beta P_i g_i}{m_a} 10^{C-0.5 \lg T - \frac{B}{T}} \quad (21)$$

В соответствии с (21), плотность тока ионов зависит от многих параметров. Главное значение имеют температура пятна и константы испарения катода. Из (21) следует выражение для температуры пятна

$$\frac{B}{T} + 0,5 \lg T = C + \lg \gamma - \lg j_i \quad \text{где} \quad \gamma = \frac{\beta P_i g_i}{m_a} \quad (22)$$

При определении температуры катодного пятна были приняты входящие в формулу для γ величины $\beta = 0.6-0.7$, $P_i = 0.3-0.4$.

В таблице 1 приведены результаты решения уравнений (22) для различных материалов катода.

Таблица 1

Параметры КП с F типом эмиссии.

Эле-мент	A	φ эВ	θ эВ	$E \cdot 10^{-7}$ В/см	$j_i \cdot 10^{-6}$ А*см ⁻²	$j_i \cdot 10^{-6}$ А*см ⁻²	T_n К	T_k К	d мкм	Тип Эми ссии
Cs	133	1,80	0,80	1,14	0,124	0,16	1440	960	1,70	F
Li	7	2,38	1,67	2,03	1,24	(1,61)	2500	1600	-	T-F
Mg	24	3,64	1,53	4,25	3,21	4,17	2470	1399	0,65	F
Ca	40	2,22	1,85	2,59	1,03	(1,34)	2960	1755	-	T-F
Pb	207	4,00	2,04	4,57	1,29	(1,68)	5200	2010	-	T-F
Hg	200	4,50	0,64	5,71	2,24	2,92	1210	634	0,31	F

При плотности тока $j_i < 10^8$ А*см⁻² основным источником энергии в катодном пятне является ионная бомбардировка. Удельная мощность источника определяется выражением $W_i = j_i * (\alpha U_c + U_i - \varphi)$. (здесь коэффициент аккомодации $\alpha \approx 1$, U_i -потенциал ионизации). Потребителями энергии в пятне с F типом эмиссии являются испарение, теплопроводность и излучение (последним, как правило, можно пренебречь). Потери энергии на испарение будут $W_{ис} = (1 - \beta P_i) \theta \nu_a$. Энергия, отводимая теплопроводностью,

определяется выражением $W_T = 2\lambda d_n(T_n - T_0)$, здесь d_n -диаметр пятна, λ -коэффициент теплопроводности, T_0 -температура катода, $T_0 \ll T_n$. Тогда уравнение энергетического баланса будет иметь вид:

$$\beta P_i g v_a (\alpha U_c + U_i - \varphi) = (1 - \beta P_i) \theta v_a + \frac{8\lambda(T_n - T_0)}{\pi d_n} \quad (23)$$

Отсюда для размера катодного пятна получаем выражение:

$$d_n = \frac{8\lambda m_a T_n}{\pi \beta \left[P_i g (\alpha U_c + U_i - \varphi) - \frac{(1 - \beta P_i) \theta v_a}{\beta} \right]} 10^{c - 0,5 \log T - \frac{B}{T}}, \text{ или } d_n = \frac{8\lambda T_n}{\pi \left[\alpha U_c + U_i - \varphi - \frac{(1 - \beta P_i) \theta}{\beta P_i} \right]} j_i \quad (24)$$

В зависимости от тепло- и электрических свойств катодов учитывая $\lambda = 2\lambda_a$, получено значение $d_n = 0,3 - 0,7$ мкм. Верхние значения d_n характерны для катодов с $\varphi < 2$ эВ и $\theta < 1$ эВ. С ростом φ и θ они снижаются до $d_n = 0,3 - 0,5$ мкм. Оценки показывают, что диапазон изменения диаметра пятна не превышает 12-15% от d_n . Таким образом, более сильная зависимость плотности тока ионов и электронов проявляется от температуры катодного пятна. Особенно это характерно для катодов с малыми значениями φ и θ . В самом деле,

$$j_i \sim \exp\left(-\frac{\theta}{kT}\right) j_e \sim \exp\left(-\frac{\varphi^2}{E}\right) \text{ и } E_n \sim \exp\left(-\frac{\theta}{2kT}\right) \quad (25)$$

а изменение температуры пятна на 10-12% вызывает изменение плотности тока ионов на $\sim 100\%$. Для плотности тока электронной эмиссии зависимость $j_e = f(T)$ еще более сильная. Достаточно увеличения температуры пятна на 2-5%, чтобы плотность тока электронов возросла примерно на порядок. По-видимому, этими факторами объясняется существенная нестационарность КП с F типом эмиссии электронов, что неоднократно наблюдалось в экспериментах с «холодными» катодами.

В четвертой Главе «Исследование вакуумно-дугового воздействия на металлическую поверхность» исследован процесс удаления поверхностных наслоений с поверхности металла в процессе вакуумно-дуговой обработки, её влияния на микроструктуру, элементный и фазовый состав поверхностного слоя, а также на морфологию поверхности обрабатываемой стали. Экспериментально изучены параметры процесса очистки металлической поверхности катодными пятнами вакуумного дугового разряда. Установлено, что оптимальным расстоянием между очищаемой поверхностью катода - трубы и рабочей поверхностью анода составляет 20-35 мм, оптимальной геометрией рабочей поверхностью анода является поверхность, повторяющая геометрию катода. В результате воздействия катодных пятен вакуумной дуги на металлическую поверхность приповерхностный материал катода переходит в парообразное состояние в центральной зоне воздействия, в средней зоне - в жидкое состояние, в периферийной области - нагревается до некоторой температуры. На рис 2. представлены фотографии поперечного разреза шлифа стального образца, обработанного вакуумным дуговым разрядом.

Было определено что в приповерхностном слое формируется двухслойная модифицированная зона, состоящая из внешнего темного обезуглероженного

слоя толщиной до 1 мкм с микротвердостью $275 \text{ кгс} \times \text{мм}^{-2}$ и последующего светлого “белого слоя” шириной 10–12 мкм. с микротвердостью – $681 \text{ кгс} \times \text{мм}^{-2}$ при микротвердости основы $346 \text{ кгс} \times \text{мм}^{-2}$.

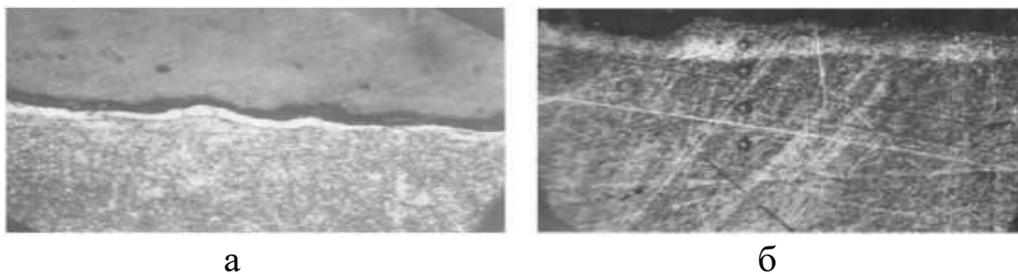


Рис.2. Фотографии поперечного разреза шлифа стального образца, обработанного вакуумным дуговым разрядом, с отпечатками пирамидки: а – на "белом слое" б – на основе .

Итак, микротвердость модифицированного слоя толщиной до 10 мкм возрастает в 1,4-1,5 раза. При этом энергетические затраты на очистку металлической поверхности составляют от 0,13 до 0,5 кВт/ч на 1 мкм.

Результаты экспериментального исследования влияния веществ с низкой работой выхода электронов (ПАВ), нанесенных на обрабатываемую вакуумным дуговым разрядом металлическую поверхность (до 20% раствора) на скорость очистки и шероховатость обработанной поверхности представлены на рис.3 а,б. Показано, что с увеличением ПАВ шероховатость поверхности быстро уменьшается, достигая минимума (10% - 15%) приблизительно в 2,5 раза меньшей величины по сравнению с нулевой концентрацией. При концентрации ПАВ более 15% шероховатость слабо возрастает, а скорость очистки имеет четко выраженный максимум, достигаемый при 10% концентрации ПАВ, что в 1.8 раза выше соответствующей величины вдали от максимума. Наиболее оптимальные результаты уменьшения шероховатости поверхности и увеличения скорости чистки были получены для КОН и NaOH.

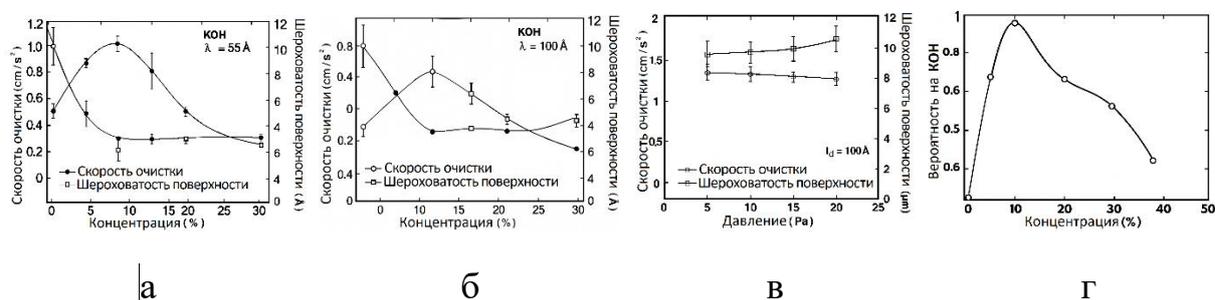


Рис.3. Зависимость шероховатости поверхности и скорости очистки от концентрации КОН и NaOH, а,- ток ВДР 50А; б–ток ВДР 110А; в - давления остаточной среды; г- вероятность образования элементарных катодных пятен (ЭКП) в зависимости от концентрации ПАВ.

Скорость очистки фактически не зависит от давления в интервале 5 - 20 Па., рис. 3в. С уменьшением давления остаточной среды в рабочем объеме и 50

увеличением тока дугового разряда шероховатость обработанной поверхности возрастает. При этом была установлена корреляция между положением экстремума вероятности формирования элементарных катодных пятен (рис.3г) от величины концентрации ПАВ, указывающая, что изменение параметров процесса очистки металлической поверхности в присутствии ПАВ обусловлено изменением вероятности образования катодных пятен. Вероятность формирования катодного пятна на поверхности достигает максимального значения при поверхностной концентрации $0,001\text{г}/\text{см}^2$ поверхностно-активных веществ (ПАВ). Поэтому подбором смеси ПАВ возможно целенаправленно получать требуемые параметры обработки и свойства поверхности.

Проведено исследование процесса синтеза нанопорошков (НП) карбида вольфрама в процессе генерации вакуумным дуговым разрядом плазменного потока оксида вольфрама. Процесс синтеза частиц карбида вольфрама осуществляют вакуумно-дуговым ионно-плазменным воздействием ионами углерода с графитового катода на капсулу порошков оксида вольфрама со связующим материалом, размещенную на торце анода в анодной плазме. На рис. 4. схема экспериментальной разрядной системы реализации процесса синтеза нанопорошков карбида вольфрама. Полученные нанопорошки карбида вольфрама из оксида вольфрама WO_3 , с использованием различных прекурсоров были исследованы на порошковом рентгеновском дифрактометре. Сначала была исследована поверхностная фаза нанопорошков, синтезированных из таблетки, содержащей только технический углерод.

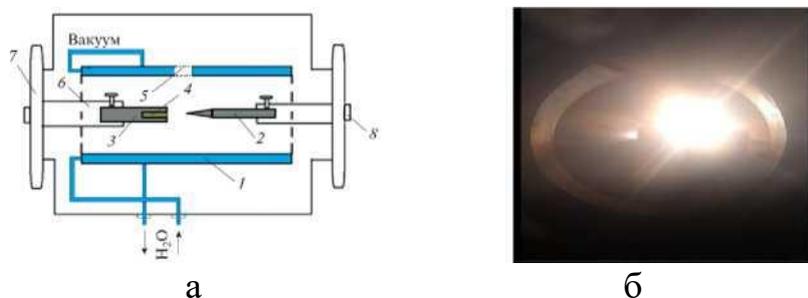


Рис. 4. Процесс синтеза нанопорошков карбида вольфрама: а - схема экспериментальной разрядной системы: 1 - охлаждаемый экран, 2 - графитовый катод, 3 – составной электрод анод; б - фотография процесса вакуумного дугового синтеза карбида вольфрама.

На рис.5а приведена рентгенограмма этого образца. Видно, что исследуемый объект состоит из нескольких фаз, каждой из которой соответствовала своя собственная дифракционная картина. Наблюдаемые на рис.5а дифракционные рефлексы соответствуют монокарбиду вольфрама WC , вольфраму W , графиту и оксиду вольфрама WO_3 , полученному со связующим материалом технический углерод. Максимальный по интенсивности рефлекс

на рентгенограмме (при $2\theta = 26.6^\circ$) соответствовал графиту. Другие интенсивные рефлексы на рентгенограмме соответствовали WO_3 . Кристаллическая решетка наночастиц монокарбида вольфрама WC являлась гексагональной, и кристаллографическая группа соответствует $R-6m^2$, что вполне отвечает литературным данным. Анализ рентгенограммы показывает, что аморфная часть порошка составляет 68.63%, (соответственно, кристалличность – 31.37%).

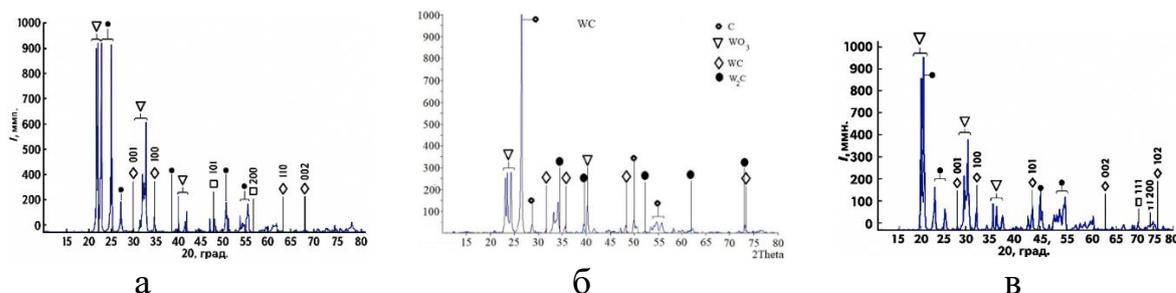


Рис. 5. Рентгенограммы осадков нанопорошков карбида вольфрама, полученных при использовании различных связующих материалов: а – технический углерод, б – щавелевая кислота, в – глюкоза.

На рис.5б представлена рентгенограмма НП карбида вольфрама, полученная от таблетки с щавелевой кислотой. Спектр образца получен при угле 2θ (phase analysis). Из рисунка 5б видно, что при углах 2θ в 31.45° , 35.65° , 48.4° , 64.1° , 73.3° , 66.1° , 75.9° и 76.95° наблюдались дифракционные рефлексы, соответствующие наночастицам монокарбида вольфрама WC. При углах 2θ 34.5° , 38.2° , 39.6° и 52.3° наблюдались дифракционные рефлексы, соответствующие наночастицам полукарбида вольфрама W_2C . Интенсивный рефлекс при угле 26.6° соответствовал графиту, также наблюдались несколько относительно неинтенсивных рефлексов C. Интенсивные рефлексы на рентгенограмме при углах 23.59° , 24.39° , 34.19° и 40.34° соответствовали WO_3 . На рис.5в. приведена рентгенограмма нанопорошков карбида вольфрама, полученная в плазме вакуумного дугового разряда. Нанопорошки WC получены с использованием таблетки со связующим материалом глюкозой. Спектр нанопорошков был получен при углах $\theta-2\theta$ (full profile analysis). Из рентгенограммы видно, что исследуемый объект состоит из нескольких фаз, а каждой фазе соответствует своя собственная дифракционная картина. Интенсивности рефлексов каждой фазы зависят от ее количества в исследуемой смеси и степени кристаллизации. Пики на рентгенограмме, показанные на рис.5в, указывают на присутствие фазы C, полукарбида вольфрама W_2C и кубического карбида вольфрама WC_{1-x} . Дифрактограмма пиков, характеризующих углеродную фазу, сужаются по мере возникновения кристаллизации. Таким образом, в результате наблюдается проявление, соответствующее sp^2 -гибридизации углерода. Пиков монокарбида вольфрама WC на этой рентгенограмме не наблюдалось. Из этого следует, что при синтезе

НП карбида вольфрама был высокий градиент температуры, и это сказывалось на формировании наночастиц карбида вольфрама. Анализ рентгенограмм показывает, что аморфизация порошка составляет 13.3%, а кристалличность - 86.7%.

Для выяснения структурных особенностей синтезированных нанопорошков был применен метод спектроскопии комбинационного рассеяния света. На рис.6 приведен такой спектр, полученный для продукта синтеза с использованием глюкозы.

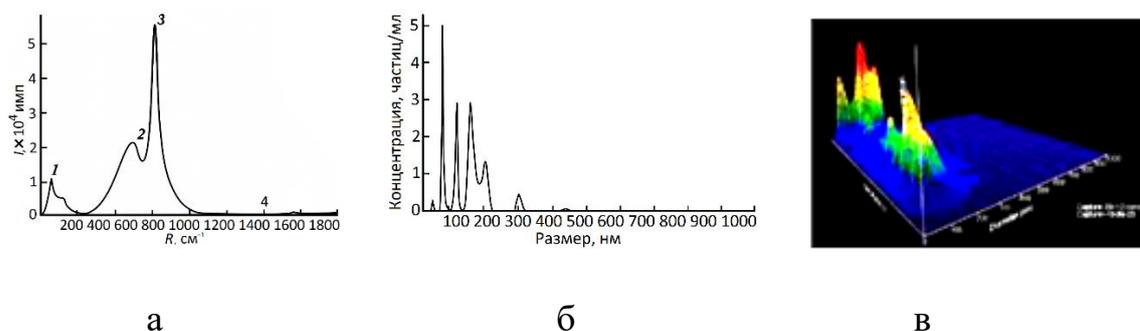


Рис.6. а- Спектр комбинационного рассеяния нанопорошка карбида вольфрама, полученного из таблетки с глюкозой. Цифрами отмечены значимые пики с волновым числом 254 (1); 694 (2); 805 (3) и 1561 см⁻¹ (4). (б) спектр средних размеров частиц. в - трехмерное распределение частиц нанопорошка карбида вольфрама.

Чистый карбид вольфрама не дает сигнал при комбинационном рассеянии света из-за жесткой структуры кристаллической решетки. В полученном же спектре присутствуют широкие линии (при значениях волнового числа 694, 805 и 254 см⁻¹), вызванные колебаниями длин связей O–W–O. Сигнал низкой интенсивности при $k = 1561$ см⁻¹ относят к углероду. Величина этого пика при рассеянии на поликристаллических образцах может быть больше, чем от монокристалла, из-за наличия множества дефектов на границах кристаллитов. Отсутствие пиков, соответствующих карбиду вольфрама, хорошо согласуются с металлическим характером этого вещества.

На рис.6в приведено трехмерное распределение по размерам частиц нанопорошка карбида вольфрама, полученного с использованием глюкозы. Диапазон размеров синтезированных частиц довольно широкий. Кривая распределения (рис.6б) демонстрирует довольно резкий подъем и спад, наибольшая наблюдаемая концентрация получена для частиц размерами в диапазоне 100–200 нм, основная масса частиц имеет размеры 37–299 нм

Исследования условий формирования комплексного процесса вакуумно-дуговой очистки металлической поверхности и последующего нанесения покрытий были направлены на изучение и оптимизацию режимов вакуумно-дуговой очистки, обработки поверхности металлических образцов с последующим нанесением покрытий, в едином технологическом цикле.

Экспериментальное исследование распределения тепловой энергии, принимаемой элементами электродной системы вакуумной дуги, показало, что аноду–диску передаётся до 71%-75% ($\eta_{ан}=0.75$) тепловой энергии от энергии вакуумного дугового разряда. С увеличением расстояния между катодом и анодом величина передаваемой тепловой энергии снижается на 4-10 %. а тепловая энергия, принимаемая изолированным цилиндрическим тепловым зондом $\eta_{цл}$ составляет 11-12% и также снижается с увеличением расстояния между катодом и анодом, но более существенно - на 30%. Было установлено, что доля тепловой энергии, приобретаемой катодом, составляет 12-13% от энергии импульсного дугового разряда и не меняется с изменением геометрии анода. Установлено также, что полная очистка металлической поверхности вакуумной дугой осуществляется при поверхностной плотности заряда $(112-115) \cdot 10^4 \text{ Кл/м}^2$. С учетом необходимой для нагрева изделия на 1 К энергии, составляющей $8.7-9.4 \text{ Кл/м}^2$, было определено, что поверхность образца нагреется до 708.15К.

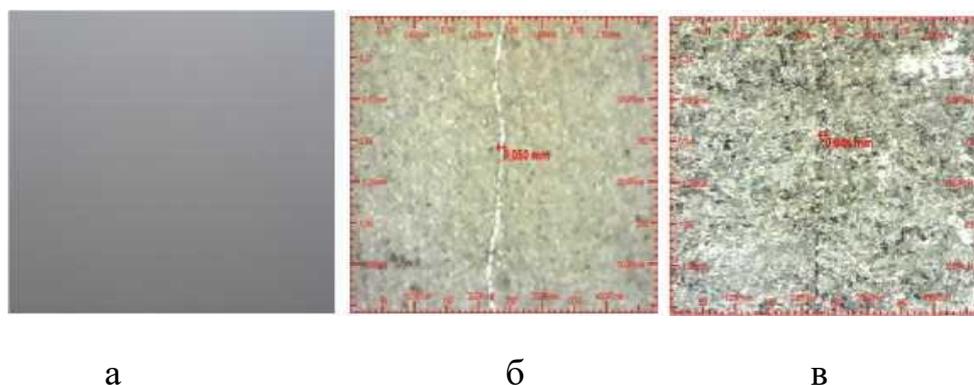


Рис.7. Фотографии: нанесенного покрытия из нерж стали –а, покрытия с царапиной - б и с царапиной под при нагрузках 100 г. – в

На рис.7 представлены фотографии, нанесенного покрытия из нерж. стали на поверхность, обработанную вакуумной дугой в едином технологическом цикле. На фотографии рис.7.а изображение покрытия нерж. стали полученные на оптическом электронном микроскопе (увеличение до $\times 500$), фотография образца с покрытием нерж. стали с царапиной на рис7.б. На рис 7.в покрытие нерж стали с царапиной, при нагрузке 100г.

Полученные результаты показывают, что покрытия, нанесенные из плазменного потока дугового разряда на поверхность, очищенную вакуумной дугой в едином технологическом цикле, имеют структуру и стехиометрический состав, соответствующий напыляемому материалу и обладают высокой прочностью.

В пятой Главе «Формирование процесса технологического ионно-плазменного воздействия вакуумной дуги на внешнюю поверхность трубчатого изделия» разработана и исследована электродная система

инициирования вакуумно-дугового разряда. На рис. 8 представлены схема двухэлектродного инсайдера (а) и вероятность генерации дугового разряда $P(\%)$ (б). Проведённые исследования показали, что при инициировании вакуумного дугового разряда игнайтером с плазмообразующей смесью из графита (рис.8б, кривая 2) вероятность пробоя составляет 80 % .

При инициировании вакуумной дуги игнайтером, имеющим в себе смесь графита и порошка серебра, вероятность пробоя составляет 93 %, (кривая 1), что на 10% больше, чем в случае с порошком графита.

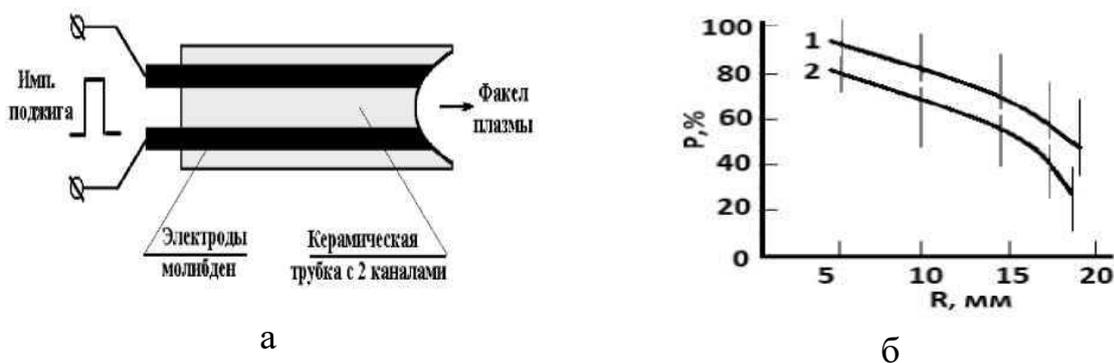


Рис.8. Схема а- двухэлектродного игнайтера, б- график вероятности генерации дугового разряда $P (\%)$.

Таким образом, присутствие дополнительных компонентов, например, таких как порошок серебра, увеличивает эффективность игнайтера, так как эта присадка имеет меньшую работу выхода электронов, что и обеспечивает значительное увеличение электронной эмиссии.

Были разработаны и исследованы технология, новые способы и технологические системы воздействия плазмы дугового разряда в вакууме на внешнюю поверхность металлической трубы, обеспечивающие высокое качество формируемых параметров обработанной поверхности металлической трубы. На рис.9 представлена разработанная нами техническая система для реализации технологического воздействия на внешнюю поверхность изделия трубы катодной плазмой вакуумной дуги.

Воздействие вакуумным дуговым разрядом осуществляется в созданном герметизированном объеме, сформированном внутренней поверхностью корпуса, в котором размещена металлическая стальная труба, и внешней, обрабатываемой поверхностью стенки трубы. Корпус снабжен посадочными устройствами, в которых коаксиально размещается обрабатываемое изделие труба с герметизирующими элементами. В результате в такой созданной нами, обладающей новизной и защищенной патентом РУз, системе обеспечивается реальная возможность обрабатывать и очищать внешнюю поверхность металлической трубы, используя её в качестве катода, а расположенный в образованной технологической вакуумной зоне вокруг трубы электрод или

корпус, используется в качестве анода. Эта конструкция позволяет также наносить на внешнюю поверхность изделия покрытие из материала электрода-катода, расположенного над внешней поверхностью обрабатываемой трубы, используется его в качестве катода. Причем, в качестве анода нами использовалось само изделие и (или) иной электрод.

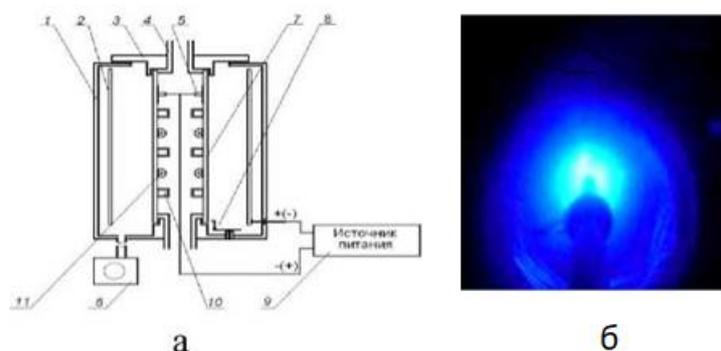


Рис. 9. Схема технической системы реализации технологического воздействия на внешнюю поверхность трубы катодной плазмой вакуумной дуги - а, фото процесса очистки внешней поверхности трубы - б.

В работе была доказана возможность осуществления в созданном нами устройстве технологических процессов обработки, очистки внешней поверхности трубы и нанесения на нее защитных, упрочняющих металлических (например, стальных) покрытий в едином технологическом цикле, в режиме последовательной технологической обработки.

В другой созданной нами, обладающей новизной и защищенной патентом РУз, технической системе для обработки внешней поверхности металлической трубы дуговым разрядом, воздействие вакуумным дуговым разрядом осуществлялось в герметизированном объеме, сформированном внешней поверхностью обрабатываемой трубы, размещенной между двумя цилиндрическими токоподводами, и внутренней поверхностью корпуса электроразрядного блока, коаксиально, герметично размещенного на внешней поверхности обрабатываемой трубы. На рис. 10 приведена схема технической системы реализации вакуумного дугового технологического воздействия на внешнюю поверхность трубы.

Устройство содержит токоподводы-1 с опорными герметизирующими шейками -2, обрабатываемое изделие - трубу -3, электроразрядный блок -4, с модулями дуговой обработки очистки -5 и нанесения покрытия -6, систему вакуумирования -7, источник постоянного тока -8, осциллятор -9, систему охлаждения -10 и нагревательный элемент -11.

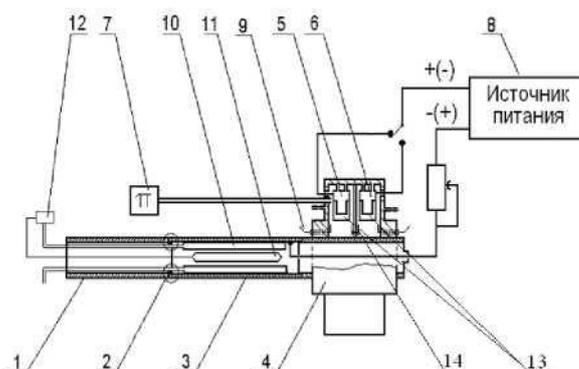


Рис.10. схема технической системы реализации вакуумного дугового технологического воздействия на внешнюю поверхность трубы.

Перемещая электроразрядный блок 4 по обрабатываемой поверхности трубы, очищают вакуумной дугой внешнюю поверхность трубы, используя её в качестве катода, а расположенный во внутреннем пространстве корпуса электроразрядного блока электрод (или корпус) в качестве анода, и наносят покрытия на внешнюю поверхность трубы, используя её в качестве анода, а размещённый в корпусе коаксиальный электрод используется в качестве катода, материал которого и наносится на обрабатываемую поверхность.

Реализуют процесс очистки и нанесения покрытия на обрабатываемую поверхность трубы как в режиме самостоятельных технологических операций, так и в едином технологическом цикле без разгерметизации технологического пространства. Разработанная технология и устройства их реализации уменьшают вакуумированный объем, обеспечивая экономию электроэнергии, создают условия управления перемещением катодных пятен по поверхности, а также возможность прямого воздействия и контроля над температурным режимом обрабатываемой поверхности из внутренней полости трубы.

В созданной и примененной нами, обладающей новизной и защищенной патентом РУз. технической системе управления параметрами распределения заряженных частиц (ионов и электронов) в ионно-плазменном потоке, генерируемом вакуумным дуговым разрядом, реализованы условия оптимизации процесса осаждения покрытий на поверхность изделия, достижения однородности, целостности и адгезии наносимого покрытия, что позволяет решать широкий спектр технологических задач.

На рис.11 представлена схема технического устройства, в котором мультипольное магнитное поле формируется электрическими магнитными катушками, размещенными на внешней поверхности корпуса источника плазмы, причем их оси симметрично расположены в плоскости, перпендикулярной оси плазменного потока, и пересекают его в одной точке.

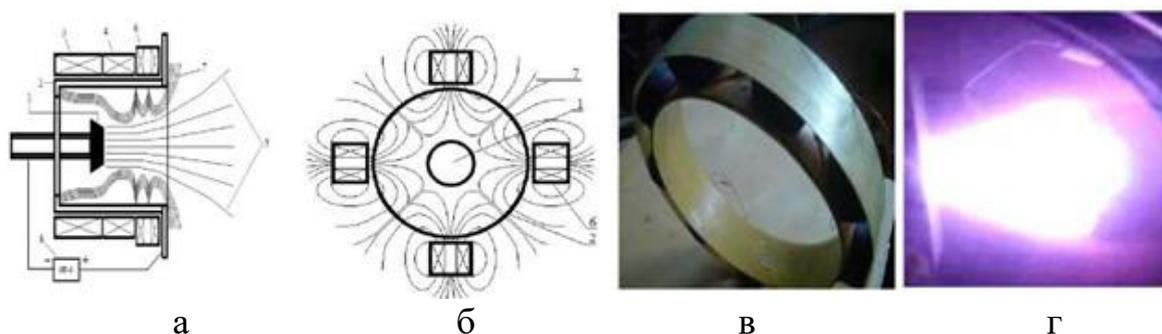


Рис. 11. Устройство вакуумно-дугового источника (ВДИП) плазмы с поперечным (радиальным), мультипольным магнитным полем: схема ВДИП- а, схема поперечного сечения магнитных линий б, система магнитов- в, фото плазменного потока -г.

Созданное нами устройство - вакуумно-дуговой источник плазмы содержит металлический катод 1, размещенный коаксиально в корпусе, являющимся анодом 2, стабилизирующую 3 и фокусирующую 4 магнитные катушки, размещенные на корпусе источника, а также разработанную нами магнитную систему управления параметрами плазменного потока, включающую магнитные катушки 5, размещенные на корпусе вакуумно-дугового источника, оси которых симметрично расположены в одной плоскости. Эти магнитные катушки формируют радиальное, мультипольное магнитное поле, управляющее пространственным распределением ионной компоненты в плазменном потоке, а также перемещают ионы плазменного потока из приосевой центральной части потока в его периферийную область. Таким образом формируется необходимое распределение и плотность ионов в потоке. Изменяя величину напряженности радиального мультипольного магнитного поля, нами обеспечены необходимые параметры плазменного потока для реализации эффективного воздействия и нанесения покрытий на обрабатываемую поверхность металлических изделий цилиндрической или иной сложной формы.

Разработанный в диссертации комплекс новых вакуумно-дуговых плазменных технологий и технических устройств для их реализации позволяет решать различные практически важные задачи в области материаловедения. В том числе, проводить очистку поверхности металлических изделий от загрязнений и окислов, упрочнять их приповерхностную область, наносить антикоррозионные защитные и упрочняющие покрытия, что позволяет увеличить эксплуатационный срок сложных металлических изделий нефте- и газового и иного технического оборудования, работающего в агрессивных средах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в диссертационной работе экспериментальные и теоретические данные и их детальный анализ позволяют сделать следующие выводы:

1. Впервые теоретическим исследованием определены условия реализации физических процессов в катодном пятне вакуумного дугового разряда на основе F-эмиссии электронов. Определено, что необходимо выполнение трёх условий: во-первых, должно формироваться оптимальное электрическое поле ($E_{\text{опт}}$); во-вторых, должен выполняться атомно-ионный баланс, при котором создается электрическое поле $E_{\text{опт}}$; в-третьих, температура катода не должна превышать температуру инверсии эффекта Ноттингама. Установлено, что теплота испарения атома катода, удовлетворяющая этим требованиям, не превышает $\lambda_a \sim 1.1 - 1.2$ эВ;

2. Определена структура и параметры катодных пятен с автоэлектронной эмиссией при напряженности электрического поля $E = (1-6) \times 10^7 \text{ В} \times \text{см}^{-1}$;
- температура в пределах $T_n = (1-2.5) \times 10^3 \text{ К}$; - плотность тока составляет $J_n = (0-15^{-3}) \times 10^7 \text{ А} \times \text{см}^{-2}$; - диаметр катодного пятна в интервале $d_n = 0.3-1$ мкм. Причем значения $d_n = 0.5-1$ мкм характерны для катодов с величиной работы выхода электронов $\phi < 2$ эВ, а $d_n = 0.3-0.5$ мкм - для катодов - с $\phi = 4.0-4.5$ эВ;

3. Экспериментально установлено, что при очистке металлической поверхности вакуумным дуговым разрядом оптимальными являются: поверхность анода, повторяющая геометрию катода, а межэлектродное расстояние между ними 20–35 мм. При этом в приповерхностном слое формируется двухслойная модифицированная зона, состоящая из внешнего темного обезуглероженного слоя толщиной до 1 мкм и “белого слоя” до 10–12 мкм, микротвёрдость которого возрастает в 1,4-1,5 раза, то есть происходит очистка поверхности катода от загрязнений и одновременно её упрочнение. С уменьшением давления остаточной среды в рабочем объеме и увеличением тока дугового разряда шероховатость обработанной поверхности возрастает;

4. Установлено, что нанесение на обрабатываемую стальную поверхность до 20% раствора поверхностно-активных веществ (ПАВ), снижающих работу выхода электронов с поверхности катода (КОН и NaOH), приводит к снижению удельных энергозатрат на вакуумно-дуговую очистку в 1,5-2.4 раза, при 10 % концентрации ПАВ – к уменьшению шероховатости поверхности в 2,5 раз, и увеличению скорости очистки в 1,8 раз. Выявлена корреляция между экстремумом вероятности формирования элементарных катодных пятен, с параметрами шероховатости поверхности и скоростью очистки от концентрации ПАВ, показывающая, что их изменение обусловлено изменением вероятности образования катодных пятен. Вероятность формирования катодного пятна на поверхности достигает максимального значения при поверхностной концентрации ПАВ $0,001 \text{ г/см}^2$;

5. Впервые осуществлён процесс вакуумно-дугового синтеза нанопорошков карбида вольфрама из оксида вольфрама с прекурсорами из

технического углерода и глюкозы, размещенными на аноде, при воздействии плазменного потока графитового катода. Получены наноразмерные (100-200нм) порошки монокарбида вольфрама WC с гексагональной кристаллической структурой. Полученные результаты обладают новизной (защищены патентом РУз) и являются основой перспективного метода синтеза нанопорошков;

6. Впервые показано, что при объединении в едином технологическом цикле процессов вакуумно-дуговой очистки металлической поверхности и нанесения на неё защитных покрытий из специальных сталей (нерж. сталь) сохраняются свойства наносимого материала (нержавеющей стали), что обеспечивает формирование высоких эксплуатационных свойств обрабатываемой поверхности. Определено, что тепловая энергия, выделяемая на аноде, составляет 71% - 75% от энергии дугового разряда, на катоде - 12-13%. Очистка металлической поверхности вакуумной дугой осуществляется при поверхностной плотности заряда $(112-115) \times 10^4 \text{ Кл/м}^2$, а нагрева изделий на 1 градус К, $(8.7-9.4) \text{ Кл/м}^2$;

7. Разработана и создана конструкция устройства инициирования вакуумного дугового разряда на основе керамической трубки с разрядником на торце, заполненным графитовой и серебряной смесью с различными добавками, повышающими эффективность плазменного импульса (эмиссию электронов и ионов);

8. Разработана коаксиальная технологическая система вакуумно-дуговой очистки внешней поверхности трубы и нанесения покрытий, осуществляемых в вакуумированном объеме, формируемом внешней поверхностью трубы и внутренней поверхностью корпуса, которые являются элементами разрядной системы технологической части вакуумной системы, защищенная патентом (РУз № IAP 05071 от 17.04.2012г.);

9. Разработана коаксиальная сканирующая технологическая система вакуумно-дуговой очистки, обработки внешней поверхности металлического трубчатого изделия и нанесения на неё покрытия электроразрядным блоком, коаксиально размещенным на внешней поверхности трубчатого изделия, при его перемещении вдоль обрабатываемой поверхности, защищенная патентом (РУз № IAP 05116 от 31.07.2012г.);

10. Впервые разработаны физические основы, техническая система управления пространственным распределением ионов в плазменном потоке, генерируемом вакуумным дуговым источником, мультипольным магнитным полем, которое создают размещенными на корпусе источника электрическими магнитными катушками, оси которых симметрично расположены в плоскости, перпендикулярной оси плазменного потока, и пересекают её в одной точке, обеспечивая эффективность процесса нанесения покрытий на обрабатываемую поверхность изделия, защищенная патентом (РУз № IAP 06630 от 20.04.2019г).

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING OF SCIENTIFIC DEGREES
DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 AT THE INSTITUTE OF ION-PLASMA
AND LASER TECHNOLOGIES**

INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES

ARUSTAMOV VLADIMIR NIKOLAEVICH

**PHYSICAL PROCESSES IN THE CATHODE SPOT OF A VACUUM ARC
DISCHARGE AND VACUUM ARC METHODS OF TREATING
METALLIC SURFACES**

01.04.04 – Physical electronics

**ABSTRACT
OF DISSERTATION DOCTOR (DSc) OF
PHYSICAL –MATHEMATICAL SCIENCES**

TASHKENT – 2025

The theme of doctoral dissertation (DSc) was registered by the Supreme Attestation Commission of the Ministry of Higher Education, Science & Innovation of the Republic of Uzbekistan under number B2024.1.DSc/FM260.

The dissertation has been prepared at the Institute of ion-plasma and laser technologies named after U.A.Arifov of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

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» (www.ziynet.uz).

Scientific consultant:

Ashurov Khatam Bakhronovich

Doctor of technical sciences, professor.

Official opponents:

Kremkov Michail Vitalievich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor

Maksimov Sergey Evlantievich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,,
Senior Researcher

Tashatov Allanazar Karshievich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor

Leading organization:

**Tashkent State Technical University named after
Islam Karimov**

The defense will take place on «7» october 2025 at 14:30 at the meeting of the Scientific Council number DSc.02/30.12.2019.FM/T.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 doctoral dissertation is can be looked through in the Information-Resource Centre of the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (is registered № 13) (Address: 100125, 33 Durmon yuli str., Tashkent, Uzbekistan. Phone: (+99871) 262-31-69).

The abstract of the dissertation is sent out on «24» september 2025.

(Mailing report № 13 on «24» september 2025).



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, professor.

U.K. Maxmanov

Chairman of scientific seminar under scientific Council on award of scientific degrees, Doctor of Physical and Mathematical Science, professor.

INTRODUCTION (abstract of the doctoral (DSc) dissertation).

The aim of the dissertation research was to analytically determine the conditions for the implementation of processes in the cathode spots of a vacuum arc discharge based on autoelectron emission and the characteristics of the cathode spot, to determine the influence of the cathode plasma on properties of the surface layer of the electrode material and the development of methods for obtaining tungsten carbide nanoparticles, vacuum arc treatment of the metal surface of products of various geometries.

To achieve the stated goal, the following research objectives were formulated: analytically investigate the conditions for the implementation of processes in the cathode spot of a vacuum arc discharge based on F-emission of electrons, and the characteristics of the cathode spot;

To study the influence of the vacuum arc treatment process, cleaning of the metal surface on the microstructure, phase composition of the surface layer;

To experimentally study the influence of substances with a low work function applied to the treated steel surface on the probability of formation of cathode spots, and the parameters of the surface layer cleaning process;

To study the conditions for the formation of a complex process of vacuum-arc cleaning of a metal surface and subsequent application of coatings in a single technological cycle.

To study the process of synthesis of tungsten carbide powders in the process of generation of a plasma flow of tungsten oxide by a vacuum arc discharge and to develop technical conditions for its implementation;

Develop methods for implementing the process of vacuum arc cleaning of the outer surface of tubular products and applying coatings to the treated surface in one technological cycle to give it high performance properties

Develop a method for controlling the charged component of the plasma flow generated by a coaxial vacuum arc source with a magnetic field, increasing the efficiency and quality of activation of the surface of the product being processed and the application of coatings to it

The object of the study is the conditions for the implementation of cathode spots of a vacuum arc discharge based on the autoemission of electrons and the features of their impact on the properties of a metal surface.

including on a surface with a layer of surface-active substances applied, as well as the process of synthesizing tungsten carbide nanopowders during the generation of a plasma flow.

The scientific novelty of the study is as follows:

For the first time, within the framework of analytical studies of processes in the cathode spot of a vacuum arc, it was determined that a vacuum arc with F-type electron emission is realized with the heat of evaporation of an atom of the cathode material not exceeding $\lambda_a \sim 1.1 - 1.2$ eV. The characteristics of cathode spots were determined;

It has been established that when cleaning a metal surface with a vacuum arc, the optimal surface is an anode that repeats the geometry of the cathode and an interelectrode distance of 20-35 mm. In this case, a two-layer zone is formed in the surface layer from an outer decarburized layer up to 1 μm thick and a “white layer” up to 10-12 μm , the microhardness of which increases by 1.4-1.5 times and is 681 kgF/mm^2 ;

It was established for the first time that substances with a low work function applied to a steel surface affect the speed of cleaning the steel surface with a vacuum arc discharge, the probability of arc discharge ignition, including that with a surface concentration of KOH and NaOH of 20%, the cleaning speed increases by 1.8 times, and the roughness of the treated surface decreases by 2.5 times

A complex process of cleaning the treated metal surface and subsequent application of coatings using a vacuum arc discharge has been substantiated and implemented; it has been shown that the implementation of these processes in a single technological cycle ensures the formation of high operational properties of the treated surface;

It was established that in the plasma of a vacuum arc discharge with a tungsten electrode containing a precursor with technical carbon and glucose, synthesis of tungsten carbide powders with a size in the range of 100–200 nm is carried out. An electrode system for implementing the process of vacuum-arc synthesis of tungsten carbide nanopowders and a technical solution protected by a patent of the Republic of Uzbekistan were developed and created;

For the first time, a technological system has been developed for vacuum-arc cleaning of the outer surface of a pipe and application of coatings, carried out in a vacuum volume formed by the outer surface of the pipe and the inner surface of the casing, which are elements of the discharge system of the technological part of the vacuum system, protected by a patent (RU No. IAP 05071 17.04.2012);

For the first time, a scanning electric discharge system for vacuum arc action on the outer surface of a metal tubular product has been developed, with modules for processing and applying a coating of an electric discharge unit, coaxially placed on the outer surface of the tubular product, as it moves along the surface being processed, protected by patent RU IAP 05116 dated 10/27/2015;

For the first time, a system for controlling a plasma source with a radial magnetic field was developed, a coaxial magnetic system for controlling the parameters of a plasma flow, a vacuum arc plasma source with a radial, multipole, magnetic field was developed, increasing its efficiency and the quality of activation of the treated surface of the product and the application of coatings to it, protected by patent RUz. IAP06630 от 20.04.2019г.)

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 165 pages of text, including 47 figures and 6 tables.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть, Part I)

1A. Khudaykulov, I. K., Ravshanov, J. R., Ashurov, K. B., Arustamov, V. N., & Usmanov, D. T. (2022). X-Ray Phase Analysis of Tungsten-Carbide Nanoparticles Synthesized Using the Vacuum-Arc Technique. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 16(4), 599-604.

2A. Arustamov, V. N., Ashurov, K. B., Kadyrov, K. K., & Khudoikulov, I. K. (2015). Complex technology of vacuum-arc processing of structural material surface. *Technical Physics*, 60, 1208-1213.

3A. Arustamov, V. N., Ashurov, K. B., Kadirov, K. K., & Khudaykulov, I. K. (2014, June). //Formation of surplus near-surface ion charge in vacuum arc cathode spot. / In 2014 Tenth International Vacuum Electron Sources Conference (IVESC) (pp. 1-2). IEEE.

4A. Arustamov, V. N., Ashurov, K. B., Kadirov, K. K., Nagaybekov, R. B., & Khudaykulov, I. K. (2014). Parameters of the cathode spot upon field emission. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 8, 828-831.

5A. Arustamov, V. N., Ashurov, K. B., Kadirov, K. K., Nagaybekov, R. B., & Khudaykulov, I. K. (2014). Structure and parameters of vacuum arc cathode spots. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 78, 558-562.

6A. Arustamov, V. N., Ashurov, K. B., Mirkarimov, A. M., Pozharov, S. L., Kadirov, K. K., & Khudaykulov, I. K. (2013). Features of the effect of vacuum arc discharge on a metal cathode surface in the presence of alkali-metal hydroxides and chlorides. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 7, 1104-1109.

7A. Арустамов, В. Н., Ашуров, Х. Б., Кадыров, Х. Х., & Худайкулов, И. Х. Модификация поверхности стального проката прикатодной плазмой вакуумного дугового разряда) *Физика и химия обработки материалов*. 2014. № 3. сс. 18-24

8A. Arustamov, V. N., Ashurov, K. B., Kadirov, K. K., & Khudaykulov, I. K. (2013). On the problem of electron-emission mechanisms in the cathode spot of a vacuum arc discharge. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 7, 740-744.

9A. Ашуров, Х. Б., Арустамов, В. Н., Худайкулов, И. Х., Равшанов, Ж. Р., & Усманов, Д. Т. (2021). Исследования наночастиц карбида вольфрама, полученных плазмохимическим методом. «Узбекский физический журнал», 23(3), 17-19.

10A. Х.Б. Ашуров, В.Н. Арустамов, Х.Х. Кадыров, И.Х. Худайкулов // «Повышение эффективности инициирования вакуумного дугового разряда» *Uzbek Journal of Physik* 2013 Vol.15(№1-2) PP.97-100.

11А. Х.Б. Ашуров, И.Х. Худайкулов// Simulation of processes in vacuum arc cathode spot. /Узбекский физический журнал, 2018г. №6 сс. 365-375.

12А. Ашуров Х.Б.Арустамов В.Н.Кадыров Х.Х.Харьяков Худайкулов И.Х. № Способ обработки внешней поверхности металлической трубы и устройство для его осуществления» Патент РУз. IAP 05071 (13) 1 17.04.2012г.

13А. АшуровХ.Б. Арустамов В.Н.Кадыров Х.Х.Харьяков, Худайкулов И.Х. «Способ электроразрядного технологического воздействия на внешнюю поверхность цилиндрических изделий в вакууме и устройство для его реализации» РУз. IAP 05116, 31.07.2012г.

14А. Арустамов В.Н., Ашуров Х. Б., Худайкулов И.Х., Арустамов Т.В, UZ «Способ управления плазменным потоком вакуумно-дугового источника» Патент РУз. (IAP 06630 от 20.04.2019г.).

II бўлим (часть II; part II)

15А. Ашуров Х.Б., Арустамов В.Н., Кадыров Х.Х. Повышение эффективности инициирования вакуумного дугового разряда. XVIII научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов "Вакуумная наука и техника". Россия Украина г. Судак. сентябрь 2012 г.

16А. Ашуров Х.Б., Арустамов В.Н., Кадыров Х.Х. High temperature corrosion-resistant coating on the inner surface of the pipe inflicted by the plasma arc discharge in vacuum. «Взаимодействие ионов с поверхностью» 25-29 августа 2011гг. Звенигород, Россия. сс. 369-372.

17А. Арустамов В.Н., Ашуров Х.Б., Кадыров Х.Х., Миркаримов А.М., Нагайбеков Р.Б. Критерий механизмов эмиссии электронов в катодном пятне вакуумной дуги Труды XX Международной конференции ВИП-2011 «Взаимодействие ионов с поверхностью» 25-29 августа 2011г Звенигород Россия.

18А. Роос Э., Майле К, Лютович А., Боезе Й. Ашуров Х.Б., Арустамов В.Н., Кадыров Х. Высокотемпературное антикоррозионное покрытие на внутренней поверхности трубы нанесенное плазмой дугового разряда в вакууме ВИП-2011 «Взаимодействие ионов с поверхностью» 25-29 августа 2011г Звенигород Россия.

19А. Арустамов В.Н, Ашуров Х.Б., Миркаримов А.М., Пожаров С.Л., Кадыров Х.Х., Урисбеков А.С. Устойчивость вакуумного дугового разряда на поверхности горячекатаных сталей и его частотные характеристики. Труды XX Международной конференции ВИП-2011 «Взаимодействие ионов с поверхностью» 25-29 августа 2011г Звенигород Россия.

20А. Арустамов В.Н, Ашуров Х.Б., Миркаримов А.М., Пожаров С.Л., Кадыров Х.Х., Худайкулов И.Х. Особенности воздействия вакуумного дугового разряда на поверхность металлического катода в присутствии гидроксидов и хлоридов щелочных металлов. Труды XX Международной конференции ВИП-2011 «Взаимодействие ионов с поверхностью» 25-29 августа 2011г. Звенигород Россия.

21А. Х.Б. Ашуров, В.Н. Арустамов, Х.Х. Кадыров. Вакуумно-дуговая обработка поверхности конструкционных токопроводящих материалов. VII Международный симпозиум по фундаментальным и прикладным проблемам науки. 11-13 сентября 2012г. Непряхино Челябинской обл. Россия.

22.А В.Н. Арустамов, И.Х. Худайкулов, В.П.Харьяков Создание плазменного потока в вакуумном дуговом разряде и формирование покрытий. XI Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2025, НИЯУ МИФИ (Москва, Россия), с.164.

23А. V.N.Arustamov, Kh.B. Ashurov, Kh.Kh.Kadirov, I.Kh.Khudaykulov. Formation of plasma technological influence of vacuum arc on the internal surfaces of metal pipes and putting of the protecting coatings. PSE-2012 13-international conference on plasma surface engineering, Garmisch-Partenkirchen Germany.

24А. Х.Б.Ашуров, В.Н.Арустамов, Х.Х. Кадыров, И.Х.Худайкулов Модификация поверхности катодной плазмой вакуумно-дугового разряда. V Международная конференция «Актуальные проблемы физической электроники» Tashkent, Uzbekistan, 2012 с.54.

25А. В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашуров, Х.Х. Кадыров, И.Х. Худойкулов К вопросу об эмиссии электронов в КП вакуумного дугового разряда 42-Тулиновская международная конференция взаимодействия частиц с кристаллами, г. Москва, Россия. мая 2012г.

26А. В.Н.Арустамов, Х.Б.Ашуров, Х.Х.Кадыров, И.Х.Худайкулов. Влияние капельной фракции потока на морфологию медных пленок при вакуумно-дуговом осаждении. VI Международная конференция по физической электронике 23-25 октября 2013 г. Ташкент Узбекистан сс.69-70

27А. В.Н.АрустамовХ.Б.Ашуров, Х.Х.Кадыров, И.Х. Худойкулов. Формирование избыточного приповерхностного ионного заряда в катодном пятне вакуумной дуги. 43-Тулиновская международная конференция взаимодействия частиц с кристаллами, 28-30 мая 2013г. Москва, Россия.

28А. В.Н. Арустамов Х.Б. Ашуров, Х.Х. Кадыров, И.Х. Худойкулов Вакуумно-дуговая обработка поверхности конструкционных токопроводящих материалов. 43-Тулиновская международная конференция взаимодействия частиц с кристаллами, 28-30 мая 2013г. Москва, Россия.

29А. В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашуров, Х.Х. Кадыров, Р.Б. Нагайбеков, И.Х. Худайкулов. Параметры катодного пятна с F-типом эмиссии. Тулиновская международная конференция взаимодействия частиц с кристаллами, 28-30 мая 2013г. Москва, Россия.

30А. В.Н.Арустамов, Х.Б.Ашуров, Х.Х.Кадыров, Р.Б.Нагайбеков, И.Х.Худайкулов. К вопросу о структуре и параметрах катодного пятна вакуумной дуги. ВИП-2013 «Взаимодействие ионов с поверхностью» 22-26 августа 2013г. Ярославль, Россия. Т.2 С.437-440.

31А. В.Н.Арустамов, Х.Б.Ашуров, Х.Х.Кадыров, Р.Б.Нагайбеков, И.Х.Худайкулов Формирование избыточного приповерхностного ионного заряда в катодном пятне вакуумной дуги Труды XX1 Международной конференции ВИП-2013 «Взаимодействие ионов с поверхностью» 22-26

августа 2013г. г. Ярославль, Россия. Т.2 С.429- 432

32А. В.Н.Арустамов, Х.Б.Ашуров, Х.Х.Кадыров, И.Х.Худайкулов Комплексная технология вакуумно- дуговой обработки поверхности конструкционных материалов и нанесения покрытий. ВИП-2013 «Взаимодействие ионов с поверхностью» 22-26 августа 2013г. Ярославль, Россия. Т.2.с.433-436.

33А. В.Н.Арустамов, Х.Б.Ашуров, Х.Х.Кадыров, И.Х.Худайкулов Плазменное технологическое воздействие вакуумного-дугового разряда на конструкционных материалов присутствии на ней щелочных веществ», Труды XXI Международной конференции ВИП-2013 «Взаимодействие ионов с поверхностью» 22-26 августа 2013г г.Ярославль, Россия. Т.2 с.425-428.

34А.В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашуров, Х.Х. Кадыров, И.Х. Худойкулов. Вакуумно-дуговая обработка поверхности конструкционных токопроводящих материалов. 43-Тулиновская международная конференция взаимодействия частиц с кристаллами, 28-30 мая 2013г. Москва, Россия.

35А. Arustamov, Kh.B. Ashurov, Kh.Kh. Kadirov», I.Kh. Khudaykulov «Formation of Surplus Near-Surface Ion Charge In Vacuum-arc Cathode Spot», 10 международная конференция по вакуумным электронным источникам. IVESC-2014, Санкт-Петербург, Россия, 30 июнь- 3 июль.

36А. В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашуров, И.Х.Худойкулов. //Влияние магнитного поля тока катода на перемещение катодных пятен вакуумной дуги./Труды XXIII Международной конференции Взаимодействие ионов с поверхностью ВИП-2017, с.216

37А. В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашуров, И.Х.Худойкулов Определение параметров формируемого плазменного потока вакуумного дугового разряда и наносимых покрытий. Труды XXIII Международной конференции Взаимодействие ионов с поверхностью ВИП-2017, с. 212

38А. Ашуров Х. Б. и др. Формирование наночастиц карбида вольфрама при синтезе плазмохимическим способом //Взаимодействие ионов с поверхностью ВИП-2021. – 2021. – с. 75-77.

39А Арустамов, В. Н., Ашуров, Х. Б., Худайкулов, И. Х., & Усманов, Д. Т. (2022). Особенности синтеза наночастиц карбида вольфрама вакуумным электродуговым методом. In *Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение* (с. 88-89).

40А. Арустамов В. Н. и др. Анализ наночастиц карбида вольфрама синтезированных вакуумным электродуговым методом //Материалы Республиканской научно-практической конференции «Проблемы фотоники и перспективы развития». – 2022.

Avtoreferat «O‘zMU xabarları» jurnali tahririyatida tahrirdan o‘tkazilib, o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlar o‘zaro muvofiqlashtirildi.

Bichimi 60×84 1/16, “Times New Roman” garniturasida terilgan.
Shartli bosma tabog‘i 3,0. Adadi 25 nusxada.

O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi
Kichik bosmaxonasida chop etildi.
100047, Toshkent, akademik Ya. G‘ulomov ko‘chasi, 70.