

**PAXTA TOZALASH VA TOLA AJRATISH MASHINALARI ISHCHI
QISMLARI SIRTINI ELEKTROKIMYOVIY HIMOYALASH ORQALI
ULARNING YEYILISHGA CHIDAMLILIGINI OSHIRISH
TEXNOLOGIYASI**

Ramazonov Sobirjon Said o'g'li

E-mail: ramazonov01@gmail.com

Ilmiy rahbar: **Sharipov Jamshid Olimovich**
texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Annotatsiya. Ushbu maqolada paxta tozalash va tola ajratish mashinalarining ishchi qismlarida yuzaga keladigan mexanik yeyilish muammosi hamda ularning xizmat muddatini oshirishda elektrokimyoviy sirt himoyalash texnologiyasidan foydalanish imkoniyatlari tadqiq etiladi. Paxtani dastlabki qayta ishlash jarayonida arrali disklar, kolosniklar, ishchi barabanlar, qirg'ichlar, pichoqlar, valiklar va boshqa metall detallar paxta tarkibidagi chang, mineral aralashmalar, qum va boshqa abraziv zarrachalar bilan uzluksiz kontaktda bo'ladi. Natijada ishchi yuzalarda abraziv, adgezion va charchash yeyilishi rivojlanib, detallarning geometrik aniqligi va texnologik jarayonning barqarorligi pasayadi. Tadqiqotda po'lat asosli ishchi qismlarning sirtiga nikel, nikel-kobalt, xrom hamda metall-keramika kompozit qoplamalarini elektrokimyoviy usulda hosil qilish imkoniyatlari tahlil qilindi. Elektrolit tarkibi, tok zichligi, pH, harorat, elektroliz davomiyligi va qoplama qalinligining sirt mikrostrukturasi, qattiqligi, adgeziyasi va yeyilish tezligiga ta'siri asosiy parametrlar sifatida belgilandi. Elektrokimyoviy qoplamalarni qo'llash orqali ishchi qismlarning sirt qattiqligi va yeyilishga chidamliligini oshirish, ishqalanish koeffitsiyentini kamaytirish hamda detallarni qayta tiklash davriyligini uzaytirish imkoniyati asoslab berildi.

Kalit so'zlar: paxta tozalash mashinalari, tola ajratish mashinalari, ishchi qismlar, yeyilish, abraziv yeyilish, elektrokimyoviy qoplama, elektrokaplama, nikel qoplama, nikel-kobalt, xrom qoplama, kompozit qoplama, sirt muhandisligi, tribologiya.

Abstract. This article investigates the problem of mechanical wear of working components of cotton cleaning and fiber separation machines and evaluates electrochemical surface protection as a method for improving their service life. During primary cotton processing, saw blades, ribs, working drums, scrapers, knives, rollers and other metallic components are continuously exposed to cotton particles, dust, mineral impurities, sand and abrasive contaminants. As a result, abrasive, adhesive and fatigue wear may develop on working surfaces, leading to dimensional degradation, reduced technological stability and increased maintenance requirements. The study considers the application of nickel, nickel-cobalt, chromium and metal-ceramic composite coatings deposited by electrochemical methods on steel-based machine

components. Electrolyte composition, current density, pH, temperature, deposition time and coating thickness are considered the main technological parameters affecting coating morphology, hardness, adhesion and wear resistance. The analysis demonstrates that optimized electrochemical coatings can improve surface hardness and wear resistance, reduce friction-related losses and extend the service interval of cotton-processing machine components.

Keywords: *cotton cleaning machines, fiber separation machines, working components, wear, abrasive wear, electrochemical coating, electrodeposition, nickel coating, nickel-cobalt coating, chromium coating, composite coating, surface engineering, tribology.*

Аннотация. *В данной статье исследуется проблема механического износа рабочих частей хлопкоочистительных и хлопкоочистительных машин, а также возможности применения электрохимической технологии защиты поверхности для увеличения срока их службы. В процессе первичной обработки хлопка пыльные полотна, гребенки, рабочие барабаны, скребки, ножи, ролики и другие металлические детали находятся в постоянном контакте с пылью, минеральными примесями, песком и другими абразивными частицами, содержащимися в хлопке. В результате на рабочих поверхностях развивается абразивный, адгезионный и усталостный износ, снижающий геометрическую точность деталей и стабильность технологического процесса. В исследовании анализируются возможности электрохимического формирования никелевых, никель-кобальтовых, хромовых и металлокерамических композитных покрытий на поверхности стальных рабочих частей. Основные параметры определялись влиянием состава электролита, плотности тока, pH, температуры, продолжительности электролиза и толщины покрытия на микроструктуру поверхности, твердость, адгезию и скорость износа. Обоснована возможность повышения твердости поверхности и износостойкости заготовок, снижения коэффициента трения и продления цикла восстановления деталей с помощью электрохимических покрытий.*

Ключевые слова: *хлопкоочистительные машины, машины для разделения волокон, заготовки, износ, абразивный износ, электрохимическое покрытие, гальваническое покрытие, никелевое покрытие, никель-кобальт, хромовое покрытие, композитное покрытие, поверхностная инженерия, трибология.*

Kirish. *Bugungi kunda paxta-to‘qimachilik sanoatida ishlab chiqarish samaradorligini oshirish, xomashyoni chuqur qayta ishlash, tayyor mahsulot sifatini yaxshilash hamda texnologik uskunalarning ekspluatatsion ishonchliligini ta’minlash dolzarb muammolardan biri hisoblanadi. Paxtani dastlabki qayta ishlash jarayonida foydalaniladigan mashina va mexanizmlarning texnik holati ishlab chiqarish jarayonining uzluksizligi, mahsulot sifat ko‘rsatkichlari, energiya sarfi va korxonaning*

iqtisodiy samaradorligiga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Ayniqsa, paxta tozalash va tola ajratish mashinalarining ishchi qismlari yuqori mexanik yuklama, takroriy ishqalanish, zarba, vibratsiya hamda paxta tarkibidagi chang, qum, mineral va boshqa begona aralashmalarning abraziv ta'siri ostida ishlashi sababli ularning sirt qatlamlarida intensiv yeyilish jarayonlari yuzaga keladi. Paxtani qayta ishlash texnologik jarayonida xomashyo tarkibidagi mineral aralashmalar, tuproq zarrachalari, qum, chang va boshqa qattiq komponentlar mashinalarning metall ishchi qismlari bilan doimiy kontaktda bo'ladi. Ushbu zarrachalar ishqalanish juftliklari orasiga tushib, metall sirtlarda mikrochizilish, mikroqir qilish, plastik deformatsiya va materialning sirt qatlamidan ajralib chiqish jarayonlarini kuchaytiradi. Natijada ishchi qismlarning dastlabki geometrik shakli va o'lchamlari o'zgaradi, texnologik tirqishlar kengayadi va ishqalanish sharoitlari yomonlashadi. Paxta tozalash mashinalaridagi "kolosnik–arra" kabi ishqalanish juftliklarining yeyilishi mashinaning ish jarayoniga bevosita ta'sir qiluvchi muhim omillardan biri sifatida qaraladi. Ishchi qismlarning yeyilishi faqat detalning xizmat muddatini qisqartirish bilan cheklanmaydi. Sirt geometriyasining o'zgarishi paxtani ushlash, tashish, tozalash va tola ajratish jarayonlarining barqarorligiga salbiy ta'sir ko'rsatishi mumkin. Yeyilgan detalning texnologik holati o'zgargan sari mashina ish rejimining optimal parametrlaridan chetga chiqishi, ishqalanish qarshiligining ortishi va energiya sarfining ko'payishi ehtimoli yuzaga keladi. Shu bilan birga, ayrim hollarda ishchi qismlarning ortiqcha yeyilishi paxta tolasini va chigitga mexanik ta'sirning kuchayishiga, tolalarning shikastlanishi yoki mahsulot sifat ko'rsatkichlarining pasayishiga sabab bo'lishi mumkin. Shu sababli paxta tozalash va tola ajratish mashinalarining ishchi qismlari sirtining yeyilishga chidamliligini oshirish texnik xizmat ko'rsatish va ta'mirlash xarajatlarini kamaytirishning muhim yo'nalishlaridan biridir. An'anaviy yondashuvda detalning butun hajmini yuqori qattqlik va yeyilishga chidamlilikka ega qimmat materialdan tayyorlash talab etilishi mumkin. Biroq bunday yondashuv material sarfining ortishiga, mexanik ishlov berish xarajatlarining ko'payishiga va ishlab chiqarish tannarxining yuqorilashiga olib keladi. Zamonaviy sirt muhandisligi esa detalning asosiy hajmiy xususiyatlarini saqlagan holda faqat ishchi sirtga kerakli funksional xususiyatlarni berish imkonini yaratadi. Sirt muhandisligi texnologiyalari orasida elektrokimyoviy qoplash alohida ahamiyatga ega. Elektrokimyoviy cho'ktirish yordamida metall yoki qotishma qatlamlarini asosiy detal sirtiga nisbatan boshqariladigan qalinlikda hosil qilish mumkin. Ushbu texnologiya nisbatan past haroratlarda amalga oshirilishi, qoplama tarkibini boshqarish imkoniyati, murakkab shaklli detallarni qoplash imkoniyati va turli funksional xususiyatlarga ega qatlamlar olish imkoniyati bilan ajralib turadi. Elektrokimyoviy qoplamalarning xususiyatlari qoplama materialining kimyoviy tarkibi bilan bir qatorda elektrolit tarkibi, tok zichligi, elektroliz davomiyligi, harorat, pH, anod-katod masofasi va elektrolitning gidrodinamik holatiga bog'liq. Zamonaviy tadqiqotlar nikel asosidagi elektrokimyoviy kompozit qoplamalarda aynan tok turi va zichligi, elektrolit tarkibi, pH, harorat,

ultratovush bilan ishlov berish hamda sirt faol moddalar kabi omillar qoplamaning mikrostrukturasi va tribologik xususiyatlariga sezilarli ta'sir ko'rsatishini ko'rsatmoqda. Nikel asosidagi qoplamalar ushbu yo'nalishda ayniqsa istiqbolli hisoblanadi. Nikelning mexanik mustahkamligi, korroziyaga chidamliligi va elektrokimyoviy yo'l bilan nisbatan boshqariladigan tarzda cho'ktirilishi uni mashinasozlik detallarining sirtini himoyalash uchun qulay materialga aylantiradi. Biroq sof nikel qoplamaning yeyilishga chidamliligini yanada oshirish uchun uning tarkibiga yuqori qattqlikka ega dispers zarrachalarni kiritish mumkin. Shu nuqtayi nazardan, nikel asosidagi kompozit elektrokimyoviy qoplamalar katta ilmiy-amaliy qiziqish uyg'otmoqda. Xususan, Ni-SiC, Ni-WC, Ni-Al₂O₃, Ni-TiO₂ va Ni-ZrO₂ kabi kompozit tizimlar o'rganilmoqda. 2024-yilda chop etilgan keng qamrovli sharhda ushbu qoplamalarga keramika zarrachalarini kiritish qattqlik, yeyilishga chidamlilik va korroziyaga chidamlilikni yaxshilashi mumkinligi ko'rsatilgan. Zarrachalarning nikel matritsasida bir tekis taqsimlanishi yeyilishga qarshi fizik to'siq hosil qilishi va nikel donalarining o'sishini cheklashi mumkin. Ayniqsa, Ni-SiC kompozit qoplama paxta tozalash va tola ajratish mashinalarining ishchi qismlari uchun alohida qiziqish uyg'otadi. Buning asosiy sababi SiC zarrachalarining yuqori qattqligi, mexanik barqarorligi va yeyilishga chidamliligidir. Elektrokimyoviy usulda olingan Ni-SiC qoplamalar bo'yicha tadqiqotlar SiC zarrachalarining nikel matritsasiga kiritilishi natijasida mikroqattqlik va yeyilishga chidamlilik oshishi mumkinligini ko'rsatgan. Bunda zarracha miqdori, ularning o'lchami, elektrolitda taqsimlanishi va cho'ktirish parametrlari qoplama xususiyatlarini belgilovchi asosiy omillar hisoblanadi. Kompozit qoplamalarda mustahkamlovchi zarrachalarning mavjudligi sirtning plastik deformatsiyasini cheklaydi. Ishqalanish vaqtida tashqi yuklama metall matritsaga ta'sir qilganda, qattiq SiC yoki WC zarrachalari yuklamaning bir qismini o'z zimmasiga oladi. Natijada nikel matritsasining plastik deformatsiyasi kamayadi, sirtning mikroqattqligi ortadi va yeyilish jarayoni sekinlashadi. Bundan tashqari, dispers zarrachalar nikel matritsasida donalarning o'sishini cheklab, mayda donali mikrostrukturaning shakllanishiga yordam berishi mumkin. Bunday strukturaviy o'zgarishlar qoplamaning mexanik va tribologik xususiyatlarini yaxshilashga xizmat qiladi. Elektrokimyoviy qoplamaning yeyilishga chidamliligi faqat qoplama tarkibiga emas, balki qoplamaning mikrostrukturaviy bir xilligiga ham bog'liq. Agar SiC, WC yoki boshqa mustahkamlovchi zarrachalar elektrolit tarkibida aglomeratsiyalansa yoki qoplama ichida notekis taqsimlansa, sirtning ayrim hududlarida kuchlanish konsentratsiyasi yuzaga kelishi mumkin. Bu esa mikro yoriqlar shakllanishiga yoki qoplamaning asosiy materialdan ajralish xavfining ortishiga olib kelishi mumkin. Shuning uchun elektrokimyoviy qoplash jarayonida zarrachalarning barqaror dispersiyasini ta'minlash, elektrolitni aralashtirish va optimal tok zichligini tanlash muhim texnologik vazifalardan biridir. Elektrokimyoviy qoplamalar uchun tok zichligi muhim texnologik parametr hisoblanadi. Tok zichligining o'zgarishi metall ionlarining katod sirtida qaytarilish tezligiga,

kristallarning o'sish xarakteriga, qoplama donalarining o'lchamiga va sirt morfologiyasiga ta'sir ko'rsatadi. Haddan tashqari past tok zichligi qoplama hosil bo'lish tezligini kamaytirishi mumkin bo'lsa, juda yuqori tok zichligi qoplama sirtining notekisligi, dendritlarning shakllanishi va boshqa texnologik nuqsonlarning paydo bo'lishiga olib kelishi mumkin. Shu sababli paxta tozalash mashinalari detallarining aniq ish sharoitlari uchun optimal elektrokimyoviy rejimni eksperimental ravishda aniqlash zarur. Elektrolitning pH qiymati va harorati ham qoplama sifatiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Elektrolitdagi metall ionlarining barqarorligi, ularning katod sirtiga yetib borish tezligi va elektroximiyaviy qaytarilish jarayoni mazkur parametrlar bilan bog'liq. Bundan tashqari, elektrolitning aralashtirish darajasi qattiq zarrachalarning cho'kish yoki aglomeratsiyalanish ehtimolini kamaytirish uchun muhimdir. So'nggi yillarda doimiy tok asosidagi an'anaviy elektrokaplama bilan bir qatorda impulsli va impulsli-reversiv elektrokimyoviy cho'ktirish usullariga ham e'tibor kuchaymoqda. Bunday texnologiyalar tok zichligi va impuls davomiyligini boshqarish orqali qoplamaning g'ovakligi, donalar o'lchami va mikrostrukturaviy xususiyatlarini optimallashtirish imkonini beradi.

Paxta tozalash va tola ajratish mashinalari uchun elektrokimyoviy qoplama tanlashda yana bir muhim omil — yeyilish mexanizmining turi hisoblanadi. Agar detal asosan abraziv zarrachalar bilan kontaktda ishlasa, yuqori qattqlikdagi kompozit qoplamalardan foydalanish maqsadga muvofiq. Agar detalda ishqalanish bilan bir qatorda korroziyaviy muhit ta'siri ham mavjud bo'lsa, qoplamaning tribokorroziyaga chidamliligi ham baholanishi kerak. Demak, qoplama materialini tanlashda faqat mikroqattqlik ko'rsatkichiga tayanish yetarli emas; qoplamaning adgeziyasi, g'ovakligi, sirt g'adir-budirligi, ishqalanish koeffitsiyenti va mikrostrukturasi kompleks ravishda o'rganilishi lozim. Mazkur masalaning yana bir muhim jihati — qoplama va asosiy metall o'rtasidagi adgeziyadir. Paxta tozalash mashinalarining ishchi qismlari takroriy mexanik yuklamalar va vibratsiya sharoitida ishlaganligi sababli qoplama asosiy metallardan ajralib ketmasligi kerak. Sirtni qoplashdan oldin yog'sizlantirish, mexanik tozalash, oksid qatlamini olib tashlash va kimyoviy faollashtirish kabi operatsiyalarni to'g'ri bajarish qoplama va substrat orasidagi bog'lanish sifatini yaxshilashga yordam beradi. Shuningdek, qoplama qalinligini optimal tanlash alohida ahamiyatga ega. Juda yupqa qoplama intensiv abraziv yeyilish sharoitida tezda yemirilishi mumkin. Haddan tashqari qalin qoplama esa ichki kuchlanishlarning ortishi, qoplamaning yorilishi yoki detalning dastlabki geometrik o'lchamlarining o'zgarishiga sabab bo'lishi mumkin. Shuning uchun qoplama qalinligi detalning ish rejimi, kontakt yuklamasi, ishqalanish tezligi va kutilayotgan xizmat muddati bilan bog'liq holda belgilanadi. Paxta tozalash mashinalarining ishchi qismlarini elektrokimyoviy qoplash masalasida yana bir muhim talab — texnologiyaning iqtisodiy samaradorligidir. Qoplama texnologiyasidan foydalanish yangi detal ishlab chiqarish o'rniga mavjud detalni qayta tiklash imkonini beradi. Bunda metall sarfi kamayadi, ta'mirlash ishlari

soddalashadi va mashinaning uzoq muddat ekspluatatsiya qilinishi ta'minlanadi. Ayniqsa, tez yeyiladigan va qimmat konstruktiv detallarni qoplash orqali qayta foydalanishga kiritish ishlab chiqarish korxonalarida resurs tejamlilikni oshirishi mumkin. Shu bilan birga, elektrokimyoviy qoplamalarning ekologik jihatlari ham e'tibordan chetda qolmasligi kerak. Elektrolit tarkibidagi kimyoviy moddalarning xavfsizligi, ishlab chiqarish chiqindilarini zararsizlantirish va texnologik jarayonda hosil bo'ladigan eritmalarni qayta ishlash zamonaviy ishlab chiqarish uchun muhim talab hisoblanadi. Shu sababli kelgusida ekologik jihatdan xavfsiz elektrolitlar, kam zaharli komponentlar va yopiq siklli elektrokimyoviy texnologiyalarni ishlab chiqish dolzarb yo'nalishlardan biri bo'lib qoladi. Tadqiqotning dolzarbligi shundan iboratki, paxta tozalash va tola ajratish mashinalarining ishchi qismlarida sodir bo'ladigan yeyilish jarayonlarini kamaytirish uchun mavjud konstruksiyani tubdan o'zgartirmasdan, aynan sirt qatlamining funksional xususiyatlarini yaxshilash imkonini beradigan texnologik yechim zarur. Elektrokimyoviy qoplash bunday vazifani bajarishda istiqbolli usullardan biri bo'lib, uning yordamida qoplama tarkibini, qalinligini va mikrostrukturaviy holatini boshqarish imkoniyati mavjud. Mazkur tadqiqotning asosiy maqsadi paxta tozalash va tola ajratish mashinalarining yeyilishga moyil ishchi qismlari sirtini elektrokimyoviy qoplamalar yordamida himoyalashning ilmiy va texnologik asoslarini ishlab chiqish hamda qoplama tarkibi va elektrokimyoviy parametrlarning ishchi sirtning yeyilishga chidamliligiga ta'sirini aniqlashdan iborat. Ushbu maqsadga erishish uchun quyidagi ilmiy vazifalarni amalga oshirish ko'zda tutiladi: paxta tozalash va tola ajratish mashinalari ishchi qismlarining yeyilish mexanizmlarini o'rganish; detal materiali va ekspluatatsiya sharoitiga mos elektrokimyoviy qoplama tarkibini tanlash; Ni, Ni-Co va nikel asosidagi kompozit qoplamalarni shakllantirish; tok zichligi, elektrolit tarkibi, pH, harorat va elektroliz davomiyligining qoplama xususiyatlariga ta'sirini aniqlash; qoplama mikrostrukturasi, mikroqattiqligi, adgeziyasi va sirt g'adir-budirligini baholash; qoplangan va qoplanmagan namunalarni tribologik sinovlardan o'tkazish hamda optimal texnologik rejimni aniqlash.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi paxta tozalash va tola ajratish mashinalarining real ekspluatatsion sharoitlarini hisobga olgan holda elektrokimyoviy kompozit qoplamalarni tanlash va ularning yeyilishga chidamliligini "qoplama tarkibi – elektrokimyoviy parametr – mikrostruktura – qattiqlik – ishqalanish – yeyilish intensivligi – ekspluatatsion resurs" bog'liqligi asosida baholashdan iborat. Tadqiqotning amaliy ahamiyati esa paxta tozalash mashinalarining yeyilgan ishchi qismlarini to'liq almashtirish o'rniga ularning ishchi sirtlarini elektrokimyoviy usulda qayta tiklash va mustahkamlash imkoniyati bilan belgilanadi. Bunday yondashuv detallar xizmat muddatini uzaytirish, ta'mirlash davriyligini kamaytirish, ehtiyot qismlar sarfini qisqartirish, metall resurslarini tejash va texnologik uskunalarning ishlash ishonchliligini oshirishga xizmat qilishi mumkin. Shunday qilib, paxta tozalash

va tola ajratish mashinalarining ishchi qismlarini elektrokimyoviy himoyalash masalasi nafaqat materialshunoslik va elektrotexnologiya, balki tribologiya, mashinasozlik, paxtani dastlabki qayta ishlash texnologiyasi va resurs tejamkor ishlab chiqarish nuqtayi nazaridan ham kompleks ilmiy tadqiqotni talab qiladi. Ayniqsa, Ni-SiC, Ni-WC va boshqa nikel asosidagi kompozit qoplamalarning abraziv yeyilish sharoitidagi xatti-harakatini o'rganish ushbu mashinalarning ekspluatatsion resursini oshirish uchun istiqbolli ilmiy yo'nalishlardan biri hisoblanadi. Zamonaviy adabiyotlarda nikel matritsasiga SiC, WC, Al₂O₃, TiO₂ va ZrO₂ kabi qattiq zarrachalarni kiritish qoplamalarning qattiqligi va yeyilishga chidamliligini oshirishi mumkinligi ko'rsatilgan. Natijada elektrokimyoviy sirt muhandisligi texnologiyalarini paxta sanoati mashinalariga moslashtirish orqali detalning asosiy materiali saqlangan holda uning faqat funksional ishchi sirtini yuqori yeyilishga chidamli holatga keltirish imkoniyati yuzaga keladi. Bu esa paxta tozalash va tola ajratish mashinalarining texnik ishonchliligini oshirish, xizmat muddatini uzaytirish va ishlab chiqarish samaradorligini yaxshilashga xizmat qiluvchi muhim ilmiy-amaliy yechim sifatida qaralishi mumkin.

Adabiyotlar tahlili. Paxta tozalash va tola ajratish mashinalari ishchi qismlarining yeyilishga chidamliligini oshirish masalasi mashinasozlik, tribologiya, materialshunoslik va sirt muhandisligi fanlarining tutashgan yo'nalishlaridan biri hisoblanadi. Mazkur muammo bo'yicha olib borilgan tadqiqotlarni shartli ravishda uchta asosiy guruhga ajratish mumkin: birinchidan, paxta tozalash mashinalari ishchi organlarining yeyilish mexanizmlarini o'rganishga bag'ishlangan tadqiqotlar; ikkinchidan, metall detallar sirtini turli qoplamalar yordamida mustahkamlashga qaratilgan ishlar; uchinchidan, elektrokimyoviy usulda olinadigan nikel, nikel-kobalt va nikel asosidagi kompozit qoplamalarning tribologik xususiyatlarini tadqiq etuvchi ilmiy ishlar. Paxta tozalash va tola ajratish mashinalarining ishchi qismlari ekspluatatsiya davomida murakkab tribologik sharoitda ishlaydi. Bunda sirtlar orasidagi mexanik kontakt, takroriy ishqalanish, zarba yuklamalari, vibratsiya va paxta xomashyosi tarkibidagi qattiq mineral zarrachalarning abraziv ta'siri bir vaqtning o'zida namoyon bo'lishi mumkin. Shu sababli ishchi qismlarning yeyilishini faqat bitta mexanizm bilan izohlash yetarli emas. Abraziv yeyilish bilan bir qatorda adgezion yeyilish, charchash natijasidagi sirt buzilishi, mikroqirqilish va ayrim hollarda korroziyaviy-ta'sirlangan yeyilish ham kuzatilishi mumkin. Adabiyotlarda paxta tozalash mashinalarining ishchi elementlari, xususan, arra tishlari, kolosniklar va ular bilan bog'liq ishqalanish juftliklarida yeyilish muammosi alohida qayd etilgan. Bunday detallar orasidagi geometrik parametrlarning o'zgarishi nafaqat ularning xizmat muddatiga, balki paxtani ushlash, tozalash va tolani ajratish samaradorligiga ham ta'sir qilishi mumkin. Demak, ushbu mashinalarning ishchi qismlarini mustahkamlashda yuqori qattiqlik bilan birga sirtning ishqalanish va abraziv yeyilish sharoitidagi barqarorligini ta'minlash talab etiladi.

Metall detallar yeyilishini kamaytirishning zamonaviy yondashuvlari. Mashinasozlikda detallarning xizmat muddatini oshirish uchun materialning butun hajmini almashtirishdan ko'ra uning faqat ishchi sirtini modifikatsiyalashga asoslangan texnologiyalar tobora keng qo'llanilmoqda. Bunday yondashuv sirt muhandisligi konsepsiyasiga asoslanadi. Uning asosiy mohiyati shundan iboratki, detalning asosiy materiali konstruktiv mustahkamlikni ta'minlaydi, sirt qatlami esa yeyilish, korroziya, ishqalanish va boshqa ekspluatatsion ta'sirlarga qarshilik ko'rsatadi. Sirtni mustahkamlashning zamonaviy usullariga termik ishlov berish, kimyoviy-termik ishlov, plazmali purkash, lazerli qoplash, fizik bug' fazasidan cho'ktirish (PVD), kimyoviy bug' fazasidan cho'ktirish (CVD), ion implantatsiyasi va elektrokimyoviy qoplash kabi texnologiyalar kiradi. Har bir usulning o'ziga xos afzalliklari va cheklovlari mavjud. Masalan, lazerli qoplash yuqori sifatli va mustahkam qatlamlar olish imkonini bersa-da, uskunaning murakkabligi va texnologik jarayonning yuqori narxi uning ayrim ta'mirlash sharoitlarida qo'llanishini cheklashi mumkin. Elektrokimyoviy qoplash esa nisbatan past haroratlarda amalga oshirilishi, qoplama qalinligini boshqarish imkoniyati, murakkab shaklli detallarni qoplashga mosligi va sanoatda keng qo'llanilganligi bilan ajralib turadi. Ni-Co qoplamalari bo'yicha keng qamrovli sharhda elektrokaplamaning nisbatan maqbul narxi, texnologik moslashuvchanligi, qoplama qalinligi va mikrostrukturasini boshqarish imkoniyati uning boshqa ayrim sirt qoplash texnologiyalariga nisbatan muhim afzalliklari sifatida ko'rsatilgan. Shu bilan birga, elektrokimyoviy qoplama texnologiyasining samaradorligi qoplama materialining o'ziga emas, balki elektrolit tarkibi, tok zichligi, harorat, pH, elektroliz davomiyligi, elektrodlar orasidagi masofa, aralashtirish va qoplama hosil bo'lish sharoitlariga ham bog'liq. Demak, qoplama texnologiyasini paxta tozalash mashinalari ishchi qismlariga moslashtirish uchun ushbu parametrlarning kompleks ta'sirini o'rganish talab etiladi.

Nikel asosidagi elektrokimyoviy qoplamalarning ilmiy asoslari. Nikel asosidagi elektrokimyoviy qoplamalar sirt muhandisligida eng ko'p tadqiq qilingan tizimlardan biridir. Buning asosiy sababi nikelning mexanik, kimyoviy va elektrokimyoviy xususiyatlarining nisbatan qulay kombinatsiyasidir. Nikel qoplamalar yuqori mustahkamlik, yaxshi korroziyaga chidamlilik, nisbatan yuqori qattiqlik va sirtni qayta ishlash imkoniyatlari bilan ajralib turadi. Sajjadnejad va hammualliflar tomonidan 2021-yilda e'lon qilingan keng qamrovli sharhda nikel matritsali elektrokimyoviy kompozit qoplamalarining tribologik xususiyatlari batafsil tahlil qilingan. Mualliflar Ni asosidagi qoplamalarning yeyilishga chidamliligi mustahkamlovchi zarrachalarning turi, miqdori, o'lchami va matritsadagi taqsimlanishiga, shuningdek elektrokimyoviy cho'ktirish parametrlariga bog'liqligini ko'rsatgan. Tadqiqotda oksidlar, karbidlar, nitridlar va qattiq moylovchi zarrachalar bilan mustahkamlangan nikel qoplamalarining ishqalanish va yeyilish xususiyatlari tahlil qilingan. Mazkur tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, sof nikel qoplamaning xususiyatlarini kompozitlashtirish orqali sezilarli darajada o'zgartirish mumkin. Qoplama qattiq dispers zarrachalarni kiritish natijasida

matritsaning deformatsiyaga qarshiligi ortadi, sirt mikroqattiqligi oshadi va ishqalanish vaqtida materialning ajralib chiqishi kamayishi mumkin. Biroq kompozit qoplamada mustahkamlovchi zarrachalarning mavjudligi avtomatik ravishda yuqori yeyilishga chidamlilikni anglatmaydi. Zarrachalarning optimal miqdori, o'lchami va taqsimlanishi muhim ahamiyatga ega. Zarrachalar konsentratsiyasi haddan tashqari oshirilganda ularning aglomeratsiyasi kuchayishi, qoplama strukturasi bir xilligi buzilishi va mexanik nuqsonlar paydo bo'lishi mumkin. Shu sababli elektrolit tarkibidagi zarracha konsentratsiyasi optimallashtirilishi kerak.

Ni-Co qotishma va kompozit qoplamalar bo'yicha tadqiqotlar. Nikel-kobalt qotishmalari elektrokimyoviy qoplamalar orasida alohida o'rin tutadi. Karimzadeh, Aliofkhazraei va Walsh tomonidan 2019-yilda chop etilgan sharhda Ni-Co qoplamalarning mexanik, korroziyaviy va tribologik xususiyatlari hamda ularning elektrokimyoviy cho'ktirish mexanizmlari tizimli ravishda ko'rib chiqilgan. Mualliflar Ni-Co qoplamalar yaxshi yeyilishga va korroziyaga chidamlilik, yuqori mexanik mustahkamlik kabi xususiyatlari tufayli sanoat uchun muhim ekanini ta'kidlaydi. Ni-Co tizimining muhim afzalliklaridan biri — qoplamaning xususiyatlarini Ni/Co nisbatini va cho'ktirish sharoitlarini o'zgartirish orqali boshqarish imkoniyatidir. Kobaltning nikel matritsasiga qo'shilishi qoplamaning mikrostrukturasi va mexanik xususiyatlarini o'zgartirishi mumkin. Bunda qoplama tarkibi tok zichligi, elektrolit tarkibi va boshqa texnologik parametrlar bilan chambarchas bog'liq. Biroq Ni-Co qoplamalarning kamchiliklari ham mavjud. Xususan, kobaltning narxi nikelga nisbatan yuqoriroq bo'lishi mumkin. Shu sababli iqtisodiy samaradorlik nuqtayi nazaridan sof Ni yoki Ni-SiC kabi qoplamalar bilan Ni-Co qoplamalarni taqqoslash muhimdir. Adabiyotlarda Ni-Co qoplamalarning mexanik va tribologik afzalliklari bilan birga, ularning tannarxi va texnologik murakkabligi ham e'tiborga olinishi lozimligi qayd etilgan. Safavi va hammualliflarning 2020-yildagi sharhida esa Ni-Co matritsasiga keramika zarrachalarini kiritish orqali kompozit qoplamalarning tribologik va korroziyaga chidamlilik xususiyatlarini yanada yaxshilash imkoniyatlari ko'rib chiqilgan. Ushbu ishda tokni boshqarish turi, elektrolit sharoitlari, zarracha miqdori va zarracha o'lchami qoplama xususiyatlarini belgilovchi muhim parametrlar sifatida ko'rsatilgan.

Ni-SiC kompozit qoplamalarining yeyilishga chidamliligi. Paxta tozalash va tola ajratish mashinalari ishchi qismlarining ekspluatatsiya sharoitini hisobga olganda, yuqori qattiqlikdagi keramika zarrachalari bilan mustahkamlangan nikel qoplamalar alohida ilmiy qiziqish uyg'otadi. Shu nuqtayi nazardan, Ni-SiC kompozit qoplama istiqbolli materiallardan biri hisoblanadi. SiC ning yuqori qattiqligi va yeyilishga chidamliligi nikel matritsasining sirt xususiyatlarini yaxshilashga yordam berishi mumkin. Ishqalanish jarayonida SiC zarrachalari nisbatan qattiq faza sifatida deformatsiyaga qarshilik ko'rsatadi va yuklamaning bir qismini qabul qiladi. Natijada nikel matritsasining intensiv plastik deformatsiyasi kamayadi. Biroq Ni-SiC

qoplamalarning tribologik xususiyatlari SiC zarrachalarining faqat mavjudligiga emas, balki ularning matritsada bir tekis taqsimlanishiga ham bog'liq. Elektrolit tarkibidagi zarrachalarning cho'kishi yoki aglomeratsiyalanishi qoplama sifatining pasayishiga olib kelishi mumkin. Shuning uchun elektrolitni doimiy aralashtirish, sirt faol moddalar yoki ultratovushli dispersiyalashdan foydalanish kabi yondashuvlar tadqiqotlarda muhim o'rin egallaydi. Nikel matritsali kompozit qoplamalar bo'yicha sharhlarda ham ultratovush, sirt faol moddalar, tok turi, tok zichligi va elektrolit tarkibi zarrachalarning qoplama kiritilishi hamda yakuniy tribologik xususiyatlarga ta'sir qiluvchi omillar sifatida ko'rsatilgan. Ni-SiC qoplamaning yana bir muhim xususiyati shundan iboratki, optimal zarracha konsentratsiyasi mavjud bo'lishi kerak. Juda kam SiC qoplamaning mustahkamlash effektini yetarli darajada namoyon qilmasligi mumkin. Aksincha, zarrachalarning ortiqcha miqdori aglomeratsiya va qoplama strukturasining buzilishiga sabab bo'lishi mumkin. Demak, Ni-SiC tizimida "ko'proq zarracha — yuqoriroq yeyilishga chidamlilik" kabi sodda bog'liqlik doimo amal qilmaydi.

Ni-WC va boshqa qattiq zarrachalar bilan mustahkamlangan qoplamalar. Ni-WC kompozit qoplamalar ham yuqori yeyilishga chidamli sirlarni shakllantirishda istiqbolli yo'nalishlardan biridir. WC ning yuqori qattiqligi va yeyilishga chidamliligi uni abraziv ishqalanish sharoitlarida qo'llash uchun jozibador qiladi. Nikel matritsasi esa qattiq zarrachalarni metall asos bilan bog'lab turuvchi uzluksiz faza vazifasini bajaradi. Adabiyotlarda nikel asosidagi kompozit qoplamalarda karbidlar, xususan SiC va WC kabi qattiq zarrachalardan foydalanish keng o'rganilgani qayd etilgan. Ushbu tizimlarning tribologik xususiyatlari zarracha turi bilan bir qatorda uning o'lchami, miqdori, matritsadagi taqsimlanishi va qoplama mikrostrukturasi bilan belgilanadi. Ni-WC qoplamaning amaliy afzalligi yuqori abraziv yuklama ostida sirtning deformatsiyaga qarshiligini oshirish imkoniyatidir. Shu sababli paxta tarkibidagi qum va mineral zarrachalar ta'sirida ishlaydigan detallar uchun bunday qoplamalar nazariy jihatdan maqsadga muvofiq bo'lishi mumkin. Shuningdek, Ni-Al₂O₃, Ni-TiO₂, Ni-ZrO₂ va boshqa keramika zarrachalari bilan mustahkamlangan qoplamalar ham ilmiy adabiyotlarda keng o'rganilgan. Bunday materiallarni tanlashda qattqlik bilan bir qatorda zarrachaning nikel matritsasi bilan o'zaro ta'siri, elektrolitda dispersiyalanish qobiliyati, sirt energiyasi va qoplama qo'shilish mexanizmi hisobga olinishi kerak.

Elektrokimyoviy qoplamaning texnologik parametrlarini optimallashtirish. Adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, qoplamaning yakuniy xususiyatlarini faqat uning kimyoviy tarkibi bilan tushuntirib bo'lmaydi. Elektrokimyoviy cho'ktirish jarayonining texnologik parametrlari qoplama mikrostrukturasi va tribologik xususiyatlarini shakllantiruvchi asosiy omillardan biridir. Sajjadnejad va hammualliflar nikel asosidagi kompozit qoplamalarning yeyilish xususiyatlari tok turi va kattaligi, elektrolit tarkibi, pH, harorat, ultratovush va sirt faol moddalar mavjudligi kabi omillarga bog'liqligini ko'rsatgan. Tok zichligi qoplama hosil bo'lish tezligi va kristallanish jarayoniga ta'sir qiladi. Past tok zichligida cho'ktirish tezligi sekinlashishi mumkin, yuqori tok zichligida

esa sirt notekisligi, dendritsimon tuzilmalar yoki ichki kuchlanishlarning ortishi ehtimoli mavjud. Shu sababli paxta tozalash mashinalari detallarining ish sharoitlari uchun optimal tok zichligini aniqlash zarur. Elektrolitning pH qiymati ham metall ionlarining qaytarilishi va qoplama shakllanish jarayoniga ta'sir ko'rsatadi. Harorat esa ionlarning diffuziyasi, elektrolitning elektr o'tkazuvchanligi va elektrokimyoviy reaksiyalar tezligini o'zgartirishi mumkin. Demak, ushbu parametrlarni bir-biridan mustaqil holda emas, balki o'zaro bog'liq tizim sifatida o'rganish maqsadga muvofiq. Ayniqsa, kompozit qoplamalarda elektrolitdagi qattiq zarrachalarning barqaror dispersiyasi muhim hisoblanadi. Agar zarrachalar cho'kib qolsa, qoplamaning kimyoviy va strukturaviy tarkibi detal sirtining turli hududlarida farqlanishi mumkin. Bu esa tribologik xususiyatlarning notekis bo'lishiga olib keladi.

Adabiyotlar tahlilidan kelib chiqib, tadqiqot uchun quyidagi ilmiy farazni ilgari surish mumkin: agar paxta tozalash mashinalarining intensiv yeyiladigan ishchi qismlari sirtiga ularning ekspluatatsion sharoitiga mos tanlangan nikel asosidagi elektrokimyoviy kompozit qoplama, xususan Ni-SiC yoki Ni-WC qoplamasi optimal texnologik parametrlar asosida hosil qilinsa, sirt mikroqattiqligi va abraziv yeyilishga chidamliligi oshib, detallarni ta'mirlash oralig'i va ekspluatatsion resursini uzaytirish imkoniyati paydo bo'ladi. Umuman olganda, adabiyotlar tahlili elektrokimyoviy qoplamalar paxta tozalash va tola ajratish mashinalarining ishchi qismlarini sirt muhandisligi asosida mustahkamlash uchun istiqbolli texnologiya ekanligini ko'rsatadi. Ayniqsa, Ni-Co qotishmalari hamda Ni-SiC va Ni-WC kabi kompozit qoplamalar yuqori yeyilishga chidamlilik talab qilinadigan detallar uchun alohida ilmiy va amaliy qiziqish uyg'otadi. Biroq qoplama tarkibi va texnologik parametrlarini aynan paxta tozalash mashinalarining ish sharoitiga mos optimallashtirish, qoplama-substrat adgeziyasini ta'minlash va tribologik sinov natijalarini real ekspluatatsion ko'rsatkichlar bilan bog'lash bo'yicha tadqiqotlarni yanada chuqurlashtirish zarur. Shu sababli keyingi tadqiqotlarda Ni, Ni-Co, Ni-SiC va Ni-WC qoplamalarini yagona metodologik yondashuv asosida taqqoslash, elektrokimyoviy cho'ktirish parametrlarini optimallashtirish, mikrostrukturaviy va tribologik xususiyatlarni kompleks baholash hamda paxta tozalash mashinalarining konkret ishchi detallarida qo'llash samaradorligini aniqlash muhim ilmiy vazifa sifatida belgilanadi.

Tadqiqot natijalari va muhokamasi. Tadqiqotning asosiy maqsadi paxta tozalash va tola ajratish mashinalarining ishchi qismlari sirtini elektrokimyoviy usulda mustahkamlash orqali ularning yeyilishga chidamliligini oshirish imkoniyatlarini aniqlashdan iborat bo'ldi. Tadqiqot konsepsiyasi ishchi detalning asosiy hajmiy xususiyatlarini saqlab qolgan holda, uning ekspluatatsion yuklama eng yuqori bo'lgan sirt qatlamiga funksional xususiyatlar berishga asoslandi. Bunda qoplama material, elektrokimyoviy cho'ktirish rejimi, qoplamaning mikrostrukturasi, sirt mikroqattiqligi, adgeziyasi va tribologik xususiyatlari o'zaro bog'liq tizim sifatida qaraldi. Zamonaviy tadqiqotlar nikel asosidagi elektrokimyoviy kompozit qoplamalarda mustahkamlovchi

zarrachalarni qo'llash qoplamaning tribologik xususiyatlarini yaxshilashi mumkinligini ko'rsatadi. Shu bilan birga, yakuniy natija zarracha turi va miqdoridan tashqari, tok zichligi, elektrolit tarkibi, pH, harorat, aralashtirish va boshqa texnologik parametrlarning o'zaro ta'siriga ham bog'liq.

Qoplamaning shakllanishi va sirt xususiyatlarining o'zgarishi. Tadqiqotda taklif etilayotgan texnologik ketma-ketlik quyidagi asosiy operatsiyalarni o'z ichiga oladi:

detalni diagnostika qilish → sirtni mexanik tozalash → yog'sizlantirish → kimyoviy faollashtirish → yuvish → elektrolitni tayyorlash → elektrokimyoviy qoplash → yuvish → quritish → qoplama qalinligini nazorat qilish → yakuniy mexanik ishlov → tribologik va mexanik sinovlar.

Bunday ketma-ketlikning asosiy vazifasi qoplama va asosiy metall orasida mustahkam adgeziya hosil qilish hamda qoplama strukturasi bir xilligini ta'minlashdan iborat. Elektrokimyoviy qoplamaning sifati ko'p jihatdan qoplashdan oldingi sirtning holatiga bog'liq. Sirt tarkibida yog', oksid, chang yoki boshqa ifloslantiruvchi moddalar qolib ketishi qoplama bilan asosiy metall orasidagi bog'lanishni susaytirishi mumkin. Elektrokimyoviy jarayon davomida metall ionlarining katod sirtida qaytarilishi natijasida qoplama qatlami shakllanadi. Agar elektrolit tarkibiga qattiq dispers zarrachalar, masalan, SiC yoki WC kiritilsa, ushbu zarrachalarning metall matritsasiga qo'shilishi natijasida kompozit struktura hosil bo'ladi.

Mazkur jarayonni soddalashtirilgan holda quyidagicha ifodalash mumkin:



Bunda nikel ionlari elektron qabul qilib, katod sirtida metall nikel shaklida cho'kadi. Kompozit qoplamada esa ushbu metall matritsa ichiga mustahkamlovchi qattiq zarrachalar mexanik va elektrokinetik jarayonlar orqali kiritiladi.

Elektrokimyoviy cho'ktirishda hosil bo'ladigan qoplama massasini nazariy jihatdan Faradey qonuni orqali baholash mumkin:

$$m = \frac{MIt\eta}{nF}$$

bu yerda m — hosil bo'lgan qoplama massasi, M — metallning molyar massasi, I — tok kuchi, t — elektroliz davomiyligi, η — tok bo'yicha chiqish koeffitsiyenti, n — elektronlar soni va F — Faradey doimiysi.

Ushbu bog'liqlik elektroliz davomiyligi va tok parametrlarini qoplama qalinligini boshqarishda muhim vosita ekanligini ko'rsatadi.

Turli qoplama tarkiblarining kutilayotgan tribologik samaradorligi. Tadqiqot konsepsiyasida qoplanmagan asosiy metall, sof Ni qoplama, Ni-Co qoplama hamda Ni-SiC va Ni-WC kompozit qoplamalarni taqqoslash maqsadga muvofiq deb belgilandi.

Ularning kutilayotgan xususiyatlari quyidagicha umumlashtirilishi mumkin:

Namuna turi	Sirt qattiqligi	Abraziv yeyilishga chidamlilik	Ishqalanish barqarorligi	Texnologik murakkablik
Qoplanmagan metall	Past/o'rtacha	Past	O'rtacha	Past
Ni	O'rtacha-yuqori	O'rtacha	Yaxshi	O'rtacha
Ni-Co	Yuqori	Yuqori	Yuqori	O'rtacha-yuqori
Ni-SiC	Yuqori	Juda yuqori bo'lishi mumkin	Yuqori	Yuqori
Ni-WC	Yuqori	Juda yuqori bo'lishi mumkin	Yuqori	Yuqori

Jadvaldagi “past”, “o'rtacha”, “yuqori” va “juda yuqori” ko'rsatkichlar real tajriba natijalari emas, balki adabiyotlar va qoplama mexanizmlariga asoslangan kutilayotgan nisbiy natijalarni ifodalaydi.

Adabiyotlar ma'lumotlariga ko'ra, Ni asosidagi kompozit qoplamalarning yeyilish xususiyatlari mustahkamlovchi zarrachalarning turi, o'lchami, miqdori va matritsada taqsimlanishiga sezilarli darajada bog'liq. Shu sababli Ni-SiC va Ni-WC qoplamalarining qoplanmagan po'latga nisbatan yuqoriroq abraziv yeyilish qarshiligini namoyon qilishi kutiladi.

Ni qoplamaning natijalari va muhokamasi. Sof nikel qoplamaning asosiy metall uchun dastlabki himoya qatlam sifatida ko'rib chiqish mumkin. Ni qoplamaning asosiy afzalligi elektrokimyoviy usulda nisbatan boshqariladigan sharoitlarda hosil qilinishi va korroziyaga chidamli sirt shakllantirish imkoniyatidir. Biroq paxta tozalash mashinalarining ishchi qismlarida asosiy muammo yuqori abraziv yuklama bilan bog'liq bo'lganligi sababli sof Ni qoplama har doim ham maksimal yeyilishga chidamlilikni ta'minlamasligi mumkin. Shu sababli nikel matritsasini qattiq dispers zarrachalar bilan mustahkamlash maqsadga muvofiq. Bu holat nikel asosidagi elektrokimyoviy kompozit qoplamalar bo'yicha ilmiy adabiyotlarda ham tasdiqlangan: qattiq zarrachalarni nikel matritsasiga kiritish orqali sirtning mexanik va tribologik xususiyatlarini yaxshilash mumkin.

Ni-Co qoplamaning tribologik xususiyatlari. Ni-Co qoplama nikel matritsasiga kobalt qo'shilishi natijasida hosil bo'ladigan qotishma qoplama sifatida ko'rib chiqildi. Ilmiy adabiyotlarda Ni-Co qoplamalarining yuqori mexanik mustahkamlik, yaxshi yeyilishga va korroziyaga chidamlilik xususiyatlari qayd etilgan. Kobaltning nikel bilan

qotishma hosil qilishi qoplamaning mikrostrukturasi va mexanik xususiyatlariga ta'sir qiladi. Tadqiqotlarda Ni–Co qoplamalarda kobalt miqdori va cho'ktirish sharoitlarini o'zgartirish orqali qattqlik, ishqalanish va yeyilish xususiyatlarini boshqarish mumkinligi ko'rsatilgan. Ayrim yuqori Co tarkibli Ni–Co qoplamalarda ishqalanish koeffitsiyentining kamayishi va ishqalanish jarayonining barqarorlashishi kuzatilgan. Mazkur xususiyatlar paxta tozalash mashinalari ishchi qismlari uchun muhimdir, chunki bunday detallar yuqori siklli ishqalanish va vibratsion yuklamalarda ishlaydi. Biroq Ni–Co qoplamaning asosiy cheklovlaridan biri kobaltning nisbatan yuqori qiymati hisoblanadi. Shu sababli amaliy jihatdan Ni–Co qoplama yuqori ekspluatatsion yuklama tushadigan, tez yeyiladigan va qiymati yuqori bo'lgan detallar uchun maqsadga muvofiq bo'lishi mumkin.

Elektrokimyoviy parametrlarning qoplama xususiyatlariga ta'siri. Tadqiqot natijalarini tahlil qilishda elektrokimyoviy parametrlarning alohida ahamiyatga ega ekanligi aniqlandi. Ayniqsa, tok zichligi qoplamaning hosil bo'lish tezligi, kristallanish jarayoni, sirt morfologiyasi va mikrostrukturasi bilan bevosita bog'liq. Tok zichligining optimal diapazonini aniqlashda ikki qarama-qarshi holatni hisobga olish zarur. Tok zichligi juda past bo'lsa, qoplama hosil bo'lish tezligi kamayadi va kerakli qalinlikni olish uchun uzoq vaqt talab qilinadi. Tok zichligi haddan tashqari yuqori bo'lsa, sirtning notekis o'sishi, dendritsimon tuzilmalarning shakllanishi va ichki kuchlanishlarning ortishi ehtimoli paydo bo'ladi. Shuning uchun paxta tozalash mashinalarining konkret ishchi detali uchun tok zichligini faqat nazariy ma'lumotlar asosida emas, balki tajribaviy optimallashtirish orqali aniqlash maqsadga muvofiq. Bundan tashqari, elektrolitning pH qiymati, harorati va aralashtirish tezligi ham qoplamaning sifatiga ta'sir qiladi. Ni asosidagi kompozit qoplamalar bo'yicha sharhlarda aynan elektrolit tarkibi, pH, harorat, tok turi, tok kattaligi va zarrachalarning dispersiyasi qoplamaning yakuniy tribologik xususiyatlarini belgilovchi muhim parametrlar sifatida ko'rsatilgan.

Qoplama mikrostrukturasi va yeyilish mexanizmining o'zgarishi. Tadqiqotning muhim natijalaridan biri sifatida qoplama mikrostrukturasi va yeyilish mexanizmi o'rtasidagi bog'liqlikni qayd etish mumkin. Qoplanmagan metall sirtida abraziv zarrachalar bilan kontakt natijasida mikrochizilish va mikroqirqilish jarayonlari nisbatan intensiv kechishi mumkin. Qattiq kompozit qoplama hosil qilinganda esa qoplamaning yuqori sirt qattqligi abraziv zarrachalarning sirtga botishiga qarshilik ko'rsatadi.

Yeyilish intensivligini umumiy holda quyidagi ko'rinishda ifodalash mumkin:

$$I_w = \frac{\Delta V}{F \cdot L}$$

bu yerda:

I_w — yeyilish intensivligi;

ΔV — yeyilish natijasida yo'qotilgan hajm;

F — normal yuklama;

L— ishqalanish yo‘li.

Mazkur ko‘rsatkich qoplamaning tribologik samaradorligini qoplanmagan material bilan taqqoslash imkonini beradi.

Agar qoplamadan keyin ΔV kamayadigan bo‘lsa, bu sirtning yeyilishga chidamliligi oshganligini ko‘rsatadi. Biroq bunda sinov yuklamasi, ishqalanish tezligi, qarshi jism materiali va muhit sharoiti bir xil saqlanishi kerak.

Qoplamaning mikroqattiqligi va yeyilish o‘rtasidagi bog‘liqlik. Qoplamaning mikroqattiqligi uning abraziv yeyilishga chidamliligini baholashda muhim ko‘rsatkichlardan biridir. Umuman olganda, mikroqattqlikning oshishi materialning plastik deformatsiyaga qarshiligini oshiradi. Ni–SiC va Ni–WC kabi kompozit qoplamalarda qattiq keramika zarrachalarining mavjudligi nikel matritsasining deformatsiyalanishini cheklashi mumkin. Natijada sirtning mikroqattqligi oshadi va abraziv zarrachalarning metall sirtiga chuqurroq kirib borishi qiyinlashadi. Biroq yuqori mikroqattqlikning o‘zi yetarli mezon emas. Agar qoplama juda mo‘rt bo‘lsa yoki substrat bilan adgeziyasi past bo‘lsa, ekspluatatsiya vaqtida mikro yoriqlar paydo bo‘lishi va qoplama qismlarining ajralib chiqishi mumkin. Shuning uchun mikroqattqlik natijalari adgeziya va tribologik sinovlar bilan birgalikda baholanishi lozim.

Umumlashtirilgan natijalar shuni ko‘rsatadiki, paxta tozalash va tola ajratish mashinalarining ishchi qismlarida yuzaga keladigan abraziv va adgezion yeyilishni kamaytirish uchun elektrokimyoviy sirt muhandisligi texnologiyasidan foydalanish ilmiy va amaliy jihatdan istiqbolli hisoblanadi. Sof Ni qoplama bazaviy himoya qatlamini shakllantirsa, Ni–Co qoplama mexanik va tribologik xususiyatlarni yaxshilash imkonini beradi. Ni–SiC va Ni–WC kompozit qoplamalar esa yuqori abraziv yuklama sharoitlarida yanada yuqori yeyilishga chidamlilikka erishish uchun istiqbolli variantlar sifatida ajralib turadi. Biroq ushbu qoplamalarning ustunligi ularning tarkibidagi mustahkamlovchi zarrachalar miqdori, o‘lchami va taqsimlanishi hamda elektrokimyoviy cho‘ktirish parametrlarining optimal tanlanishiga bog‘liq. Shu asosda paxta tozalash mashinalarining ishchi qismlari uchun elektrokimyoviy qoplamalarni ishlab chiqishda “material–sirt–qoplama–mikrostruktura–tribologiya–ekspluatatsiya” tamoyiliga asoslangan kompleks yondashuvni qo‘llash maqsadga muvofiqdir. Kelgusidagi eksperimental tadqiqotlarda qoplanmagan detal, Ni, Ni–Co, Ni–SiC va Ni–WC qoplamalarini bir xil yuklama va ishqalanish sharoitida sinash, ularning mikroqattqligi, ishqalanish koeffitsiyenti, yeyilish intensivligi, adgeziyasi va sirt morfologiyasini taqqoslash zarur. Shu orqali paxta tozalash mashinalarining konkret ishchi qismlari uchun optimal qoplama tarkibi va elektrokimyoviy texnologik rejimni ilmiy asosda aniqlash mumkin.

Xulosa. Olib borilgan tadqiqotlar, ilmiy adabiyotlar tahlili va elektrokimyoviy sirt muhandisligi texnologiyalarining nazariy asoslarini umumlashtirish natijasida paxta tozalash va tola ajratish mashinalarining ishchi qismlari sirtini elektrokimyoviy

qoplamalar yordamida mustahkamlash ularning yeyilishga chidamliligini oshirishning istiqbolli yo'nalishlaridan biri ekanligi aniqlandi. Paxta tozalash va tola ajratish mashinalarining ishchi qismlari ekspluatatsiya davomida yuqori mexanik va tribologik yuklamalar, takroriy ishqalanish, vibratsiya hamda paxta xomashyosi tarkibidagi qum, chang va mineral zarrachalarning abraziv ta'siriga duch keladi. Ushbu omillar detal sirtida mikroqirqilish, mikrochizilish, plastik deformatsiya va boshqa yeyilish jarayonlarining rivojlanishiga olib keladi. Natijada ishchi qismlarning geometrik o'lchamlari o'zgarib, mashinaning texnologik samaradorligi va ekspluatatsion ishonchliligi pasayishi mumkin. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, mazkur muammoni detalning butun hajmini qimmat va yuqori yeyilishga chidamli materialdan tayyorlash orqali emas, balki uning faqat ishchi sirtini funksional qoplama bilan mustahkamlash orqali hal etish maqsadga muvofiqdir. Elektrokimyoviy qoplash texnologiyasi ushbu vazifani bajarishda muhim afzalliklarga ega bo'lib, qoplama qalinligi va tarkibini boshqarish, turli shakldagi detallarni qoplash hamda sirtning mexanik va tribologik xususiyatlarini maqsadli ravishda o'zgartirish imkonini beradi. Adabiyotlar tahlili nikel asosidagi elektrokimyoviy kompozit qoplamalar, ayniqsa Ni-Co, Ni-SiC va Ni-WC tizimlari yuqori yeyilishga chidamlilik talab qilinadigan detallar uchun istiqbolli ekanligini ko'rsatdi. Nikel matritsasiga qattiq dispers zarrachalarning kiritilishi sirtning mikroqattiqligi va deformatsiyaga qarshiligini oshirishi, abraziv yeyilish jarayonini sekinlashtirishi hamda ishqalanish xususiyatlarini yaxshilashi mumkin. Nikel matritsali elektrokimyoviy kompozitlar bo'yicha sharhlar ham mustahkamlovchi zarrachalarning turi, o'lchami, miqdori va taqsimlanishi qoplamaning yeyilish xususiyatlariga sezilarli ta'sir ko'rsatishini tasdiqlaydi. Tadqiqotning amaliy ahamiyati shundan iboratki, elektrokimyoviy qoplamalardan foydalanish yeyilgan ishchi detallarni to'liq almashtirish o'rniga ularning sirtlarini qayta tiklash va mustahkamlash imkonini beradi. Bu esa ehtiyot qismlar sarfini kamaytirish, metall resurslarini tejash, ta'mirlash oralig'ini uzaytirish va mashinalarning ekspluatatsion tayyorgarligini oshirishga xizmat qilishi mumkin. Umuman olganda, tadqiqot natijalari asosida paxta tozalash va tola ajratish mashinalarining ishchi qismlarini elektrokimyoviy himoyalashda "detal materiali – ekspluatatsion muhit – yeyilish mexanizmi – qoplama tarkibi – elektrokimyoviy parametr – mikrostruktura – mikroqattiqlik – tribologik xususiyat – xizmat muddati" ketma-ketligiga asoslangan kompleks yondashuvni qo'llash maqsadga muvofiq degan xulosaga kelindi. Kelgusidagi eksperimental tadqiqotlarda qoplanmagan namunalar bilan bir qatorda Ni, Ni-Co, Ni-SiC va Ni-WC qoplamalarini bir xil ishqalanish va yuklama sharoitida sinash, ularning mikroqattiqligi, adgeziyasi, ishqalanish koeffitsiyenti va yeyilish intensivligini miqdoriy jihatdan aniqlash hamda olingan natijalarni real paxta tozalash mashinalari ishchi qismlarida sinovdan o'tkazish maqsadga muvofiqdir. Bu orqali qoplamaning optimal tarkibi va elektrokimyoviy

texnologik rejimini aniqlash hamda uning iqtisodiy samaradorligini baholash imkoniyati yaratiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Sajjadnejad, M., Haghshenas, S. M. S., Badr, P., Setoudeh, N., & Hosseinpour, S. (2021). Wear and tribological characterization of nickel matrix electrodeposited composites: A review. *Wear*, 486–487, 204098. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204098>
2. Karimzadeh, A., Aliofkhazraei, M., & Walsh, F. C. (2019). A review of electrodeposited Ni-Co alloy and composite coatings: Microstructure, properties and applications. *Surface and Coatings Technology*, 372, 463–498. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.04.079>
3. Safavi, M. S., Tanhaei, M., Farshbaf Ahmadipour, M., Ghaffari Adli, R., Mahdavi, S., & Walsh, F. C. (2020). Electrodeposited Ni-Co alloy-particle composite coatings: A comprehensive review. *Surface and Coatings Technology*, 382, 125153. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125153>
4. Walsh, F. C., & Ponce de León, C. (2020). The electrodeposition of composite coatings: Diversity, applications and challenges. *Current Opinion in Electrochemistry*, 20, 8–19. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2020.01.011>
5. Walsh, F. C. (2025). Advanced tribological coatings by electrodeposition: Challenges and examples. *Transactions of the IMF*, 103(6), 286–290. <https://doi.org/10.1080/00202967.2025.2569168>
6. Chung, P. P., Wang, J., & Durandet, Y. (2019). Deposition processes and properties of coatings on steel fasteners—A review. *Friction*, 7, 389–416. <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0304-4>
7. Aliofkhazraei, M., Walsh, F. C., Zangari, G., et al. (2021). Development of electrodeposited multilayer coatings: A review of fabrication, microstructure, properties and applications. *Applied Surface Science Advances*, 6, 100141.
8. Protsenko, V. (2025). A review on electrodeposition and tribological performance of chromium-based coatings from eco-friendly trivalent chromium baths. *Discover Electrochemistry*, 2, 22.
9. Wang, X., Zhao, W., Shi, T., et al. (2025). A Review on Tribological Wear and Corrosion Resistance of Surface Coatings on Steel Substrates. *Coatings*, 15(11), 1314. <https://doi.org/10.3390/coatings15111314>
10. Electrochemical Deposition of Ni, NiCo Alloy and NiCo–Ceramic Composite Coatings—A Critical Review. (2020). *Materials*.
11. Electrodeposited carbon nanostructured nickel composite coatings: A review. (2024). *Heliyon*, 10(8), e26051. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26051>

12. Wen, Y., Zhao, Y., Zhang, Z., Wu, Y., Zhu, H., Xu, K., & Liu, Y. (2024). Electrodeposition of NiMo alloys and composite coatings: A review and future directions. *Journal of Manufacturing Processes*, 119, 929–951. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.03.099>
13. Electrodeposition of NiP alloy coatings: A review. (2019). *Surface and Coatings Technology*, 369, 198–220. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.03.055>
14. Electrodeposition of NiP composite coatings: A review. (2019). *Surface and Coatings Technology*, 378, 124803. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.07.027>
15. Strengthening mechanisms and tribological aspects of ceramic particle reinforced electrodeposited metal matrix composites – A review. (2025). *Journal of Alloys and Compounds*, 1037, 182288. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.182288>
16. Atajanov, A. B., & Safoev, A. A. (2021). Theoretical study of a pair of “grate-saw” to reduce the wear of the grooves. *Galaxy International Interdisciplinary Research Journal*, 9(9).
17. Study on the properties and process of gin sawtooth blades via PCVD. (2026). *Discover Applied Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s42452-026-08261-5>
18. Electrodeposition and corrosion behavior of nano-structured Ni-WC and Ni-Co-WC composite coating. (2017). *Materials/Surface Engineering literature on Ni-WC composite coatings*.
19. The kinetics of Ni–Co/SiC composite coatings electrodeposition. (2010). *Journal of Alloys and Compounds*.
20. Electrodeposited nickel–cobalt composite coating containing nano-sized Si₃N₄. (2005). *Materials Science and Engineering*.
21. Costa, J. M., et al. (2018). Cr₂O₃ nanoparticles: A promising candidate to improve the mechanical properties and corrosion resistance of Ni-Co alloy coatings. *Ceramics International*.
22. Rasooli, A., et al. (2020). Ultrasound-assisted electrodeposition and synthesis of alloys and composite materials: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*.
23. Electrodeposition of composite coatings: Diversity, applications and challenges. (2020). *Current Opinion in Electrochemistry*, 20, 8–19. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2020.01.011>
24. A review on tribological wear and corrosion resistance of surface coatings on steel substrates. (2025). *Coatings*, 15(11), 1314. <https://doi.org/10.3390/coatings15111314>
25. Recent trends and developments in two-dimensional materials based electrodeposited nickel nanocomposite coatings. (2024). *Surface Engineering / Electrochemical Coatings literature*.