FAN VA TEXNOLOGIYALAR
НАУКА И ТЕХНОЛОГИИ
SCIENCE AND TECHNOLOGIES
VOLUME 01, ISSUE 02, 2026

UDK: 620.193:620.197

METALL KONSTRUKSIYALARDA KORROZIYA JARAYONLARI VA ZAMONAVIY HIMOYA USULLARINING QIYOSIY TAHLILI

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОРРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЯХ И СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ

COMPARATIVE ANALYSIS OF CORROSION PROCESSES IN METAL STRUCTURES AND MODERN PROTECTION METHODS

Eshqorayev Samariddin
Termiz davlat muhandislik va agrotexnologiya universiteti
02.00.14 - Organik moddalar va ularga asosidagi materiallar texnologiyasi ixtisosligi tayanch doktoranti
E-mail: samariddineshqorayev@gmail.com
https://orcid.org/0009-0001-7068-1564

Annotatsiya

Maqolada metall konstruksiyalarda korroziyaning shakllanish mexanizmlari, uni tezlashtiruvchi ekspluatatsion omillar va zamonaviy himoya usullarining samaradorligi tahlil qilindi. Tadqiqot tajriba natijalarini da’vo qilmaydigan, 2016–2025-yillarda e’lon qilingan xalqaro standartlar, monografiyalar va ochiq ilmiy maqolalarga tayangan tuzilmaviy adabiyotlar tahlili hamda ko‘p mezonli baholash usulida bajarildi. Himoya strategiyalari samaradorlik, xizmat muddati, iqtisodiy maqbullik, ekologik xavfsizlik va turli obyektlarga moslashuvchanlik mezonlari bo‘yicha 1–5 ballik shkala asosida qiyoslandi. Tahlil natijasida alohida qo‘llangan qoplama, katod himoyasi yoki inhibitor tizimi korroziya xavfini to‘liq bartaraf etmasligi, eng yuqori natija esa materialni to‘g‘ri tanlash, yuzani tayyorlash, himoya qoplamasi, elektrokimyoviy himoya va monitoringni yagona boshqaruv sikliga birlashtirganda kuzatilishi aniqlandi. Integrallashgan tizimning integral bahosi 4,63 ballni tashkil etdi. Maqola sanoat korxonalari, quvur tarmoqlari, metall konstruksiyalar va energetika obyektlarida korroziyani boshqarish dasturlarini ishlab chiqish uchun amaliy yondashuvni taklif etadi.

Kalit so‘zlar: korroziya, elektrokimyoviy jarayon, metall konstruksiya, himoya qoplamasi, katod himoyasi, inhibitor, monitoring, korroziyani boshqarish.

Аннотация

В статье проанализированы механизмы формирования коррозии в металлических конструкциях, эксплуатационные факторы, ускоряющие разрушение, и эффективность современных способов защиты. Исследование выполнено как структурированный обзор международных стандартов, монографий и открытых научных публикаций 2016–2025 годов с применением многокритериальной оценки; оно не заявляет о проведении собственных лабораторных испытаний. Защитные стратегии сопоставлены по пяти критериям: эффективность, долговечность, экономическая приемлемость, экологическая безопасность и адаптивность к различным объектам. Результаты показывают, что отдельное применение покрытия, катодной защиты либо ингибитора не устраняет системные причины коррозионного риска. Наибольшая результативность достигается при объединении выбора материала, подготовки поверхности, барьерного покрытия, электрохимической защиты и мониторинга в единый жизненный цикл управления. Интегрированная стратегия получила итоговую оценку 4,63 балла из 5. Предложенный подход может быть использован при разработке программ управления коррозией на промышленных предприятиях, трубопроводах, энергетических объектах и металлических сооружениях.

Ключевые слова: коррозия, электрохимический процесс, металлическая конструкция, защитное покрытие, катодная защита, ингибитор, мониторинг, управление коррозией.

Abstract

This article analyses the mechanisms of corrosion development in metal structures, operational factors that accelerate degradation, and the comparative performance of modern protection methods. The study is a structured synthesis of international standards, monographs, and open-access scientific publications issued between 2016 and 2025; it does not claim original laboratory testing. Protection strategies were compared using a five-criterion model covering technical effectiveness, durability, economic feasibility, environmental safety, and adaptability to different assets. The findings show that a coating, cathodic protection system, or inhibitor applied in isolation cannot eliminate systemic corrosion risk. The strongest performance is achieved when material selection, surface preparation, barrier coating, electrochemical protection, and condition monitoring are integrated into a single life-cycle management process. The integrated strategy achieved a weighted score of 4.63 out of 5. The proposed framework can support corrosion-management programmes for industrial plants, pipelines, energy facilities, transport infrastructure, and other metal assets.

Keywords: corrosion, electrochemical process, metal structure, protective coating, cathodic protection, inhibitor, monitoring, corrosion management.

1. Kirish

Korroziya metall va atrof-muhit o‘rtasidagi fizik-kimyoviy o‘zaro ta’sir natijasida material xossalarining yomonlashuvi hamda metall, muhit yoki ulardan tashkil topgan texnik tizim funksiyasining buzilishidir. Mazkur ta’rif korroziyani faqat sirtning zanglashi sifatida emas, balki konstruksiyaning mustahkamligi, zichligi, issiqlik almashinuvi, elektr o‘tkazuvchanligi va xavfsizlik ko‘rsatkichlariga ta’sir qiluvchi tizimli degradatsiya jarayoni sifatida ko‘rishni talab qiladi (ISO, 2024). Po‘lat quvurlar, rezervuarlar, ko‘prik elementlari, issiqlik almashgichlar, kimyoviy reaktorlar va qishloq xo‘jaligi texnikalarida korroziya ko‘pincha asta-sekin rivojlanadi, biroq mahalliy nuqson chuqurlashgach, teshilish, yorilish yoki yuk ko‘tarish qobiliyatining keskin pasayishi shaklida namoyon bo‘ladi.

Korroziyaning iqtisodiy oqibati bevosita ta’mirlash xarajatlari bilan cheklanmaydi. Unga uskunaning rejadan tashqari to‘xtashi, mahsulot yo‘qotilishi, energiya sarfining ortishi, ekologik zarar, avariya oqibatlarini bartaraf etish va sug‘urta xarajatlari ham kiradi. AMPP tomonidan e’lon qilingan IMPACT tadqiqotida global korroziya qiymati yiliga qariyb 2,5 trillion AQSh dollari yoki jahon yalpi ichki mahsulotining taxminan 3,4 foizi sifatida baholangan; mavjud boshqaruv amaliyotlari to‘g‘ri joriy etilsa, mazkur yo‘qotishlarning 15–35 foizini kamaytirish mumkinligi qayd etiladi (Koch et al., 2016). Bu raqamlar korroziyani texnik xizmatning ikkilamchi masalasi emas, balki aktivlar xavfsizligi va iqtisodiy samaradorligining markaziy omili sifatida boshqarish zarurligini ko‘rsatadi.

Metall yuzasida korroziya rivojlanishi uchun anod va katod zonalarining paydo bo‘lishi, ular orasida elektron o‘tishi va ionlar harakatini ta’minlaydigan elektrolit mavjud bo‘lishi kifoya. Mikrostrukturadagi notekisliklar, payvand choklari, mexanik kuchlanish, turli metallarning tutashuvi, sirt iflosligi yoki kislorod konsentratsiyasining farqi mahalliy potensial tafovutini yuzaga keltiradi. Anod zonasida metall ion holatiga o‘tib eriydi, katod zonasida esa kislorod yoki vodorod ionlari qaytariladi. Namlik, xloridlar, kislotalilik, yuqori harorat, oqim tezligi va mikroorganizmlar mazkur reaksiyalar kinetikasini tezlashtiradi. Ayniqsa, xloridli muhit passiv qatlamni buzib, nuqtaviy korroziya va kuchlanish ostida korroziyaviy yorilish xavfini oshiradi.

Amaliyotdagi asosiy muammo shundaki, korroziyaga qarshi chora ko‘pincha alohida mahsulot tanlash darajasiga tushirib qo‘yiladi. Masalan, qimmat qoplama sifatsiz tayyorlangan sirtga surtilsa, uning nominal xizmat muddati ta’minlanmaydi; katod himoyasi elektr izolyatsiyalangan yoki ekranlangan zonalarda yetarli tok tarqatmaydi; inhibitor konsentratsiyasi oqim rejimi va haroratga

mos boshqarilmasa, himoya plyonkasi uzluksiz hosil bo‘lmaydi. Shuning uchun korroziya muammosini “eng yaxshi qoplama” yoki “eng kuchli inhibitor” orqali yechish haqidagi yondashuv zaifdir. To‘g‘ri yondashuv muhit, material, konstruktiv detal, himoya tizimi, sifat nazorati va monitoringni bir-biriga bog‘langan elementlar sifatida ko‘rib chiqadi.

Tadqiqotning maqsadi metall konstruksiyalarda korroziyani keltirib chiqaruvchi asosiy omillarni tizimlashtirish, zamonaviy himoya usullarini yagona mezonlar asosida taqqoslash va korroziyani hayotiy sikl bo‘yicha boshqarish uchun amaliy model ishlab chiqishdan iborat. Ushbu maqsadga erishish uchun uchta vazifa belgilandi: birinchidan, korroziyaning elektrokimyoviy mohiyati va keng tarqalgan shakllari bo‘yicha adabiyotlar umumlashtirildi; ikkinchidan, qoplamalar, katod himoyasi, inhibitorlar, material tanlash va monitoringning kuchli hamda zaif tomonlari baholandi; uchinchidan, ularni alohida emas, integrallashgan boshqaruv tizimida qo‘llashning ustuvorligi asoslandi.

2. Metodologiya va adabiyotlar tahlili

Tadqiqot dizayni tuzilmaviy adabiyotlar tahlili va ko‘p mezonli qaror qabul qilish modelini birlashtirdi. Tahlil doirasiga 2016–2025-yillarda chop etilgan korroziya boshqaruvi, himoya qoplamalari, katod himoyasi, neft-gaz sanoatidagi inhibitorlar va ekologik xavfsiz ingibitorlarga bag‘ishlangan ochiq ilmiy ishlar kiritildi. Shuningdek, korroziya atamalari bo‘yicha ISO 8044:2024 standarti, AMPP IMPACT tadqiqoti va korroziya muhandisligiga oid fundamental monografiyalardan foydalanildi. Manbalarni tanlashda metall konstruksiyalarga bevosita aloqadorlik, mexanizm yoki himoya usulining tushuntirilishi, natijalar va cheklovlarning ochiq bayon qilinishi hamda bibliografik ma’lumotlarning tekshirilishi mezon sifatida qabul qilindi.

Tahlil jarayonida korroziya shakllari umumiy, galvanik, nuqtaviy, tirqishli, eroziya-korroziya, mikrobiologik ta’sirlangan korroziya va kuchlanish ostida yorilish guruhlariga ajratildi. Bunday tasnif muhim, chunki umumiy massa yo‘qotilishi bilan kechadigan korroziya tezlik bo‘yicha nisbatan oson nazorat qilinadi, mahalliy korroziya esa tashqi sirt deyarli butun ko‘ringan sharoitda ham qisqa muddatda teshilish hosil qilishi mumkin. Shu sababli korroziya xavfini faqat o‘rtacha massa yo‘qotishi bilan baholash yetarli emas; maksimal chuqurlik, nuqsonlar zichligi, potensial, qoplama qarshiligi va texnologik parametrlar birgalikda kuzatilishi kerak.

Massa yo‘qotish usulida korroziya tezligi $K = \Delta m/(S \cdot t)$ ifodasi bilan baholanadi; bunda Δm — tozalashdan keyingi massa yo‘qotishi, S — namunaning ochiq sirt maydoni, t — ta’sir davomiyligi. Himoya samaradorligi $\eta = [(K_0 - K_1)/K_0] \times 100\%$ orqali ifodalanadi, bunda K_0 himoyasiz, K_1 esa himoya qo‘llangan sharoitdagi korroziya tezligidir. Ushbu ko‘rsatkich laboratoriya tajribalarida qulay bo‘lsa-da, real obyektlarda himoya sifatini faqat bitta foiz bilan ifodalash xavfli: qatlamning mahalliy shikastlanishi, tok taqsimotining notekisligi va servisga yaroqlilik kabi omillar ham hisobga olinishi lozim.

Ko‘p mezonli qiyoslashda besh mezon tanlandi: texnik samaradorlik (E), kutiladigan xizmat muddati va barqarorlik (D), iqtisodiy maqbullik (C), ekologik xavfsizlik (A) hamda turli obyektlarga moslashuvchanlik va nazorat qilinuvchanlik (M). Integral baho $Q = 0{,}30E + 0{,}25D + 0{,}15C + 0{,}15A + 0{,}15M$ formula bo‘yicha hisoblandi. Har bir mezon 1 dan 5 gacha ball bilan baholandi. Ballar alohida tajriba natijasi sifatida emas, tanlangan adabiyotlarda qayd etilgan afzallik, cheklov, xizmat muddati va qo‘llash shartlarini bir xil shkalaga keltiruvchi ekspert-analitik indeks sifatida talqin qilindi.

Adabiyotlar tahlili qoplamalarning asosiy vazifasi metallni suv, kislorod va ionlardan ajratish ekanini ko‘rsatadi. Epoksi, poliuretan va ko‘p qatlamli gibrid tizimlar yuqori barrier xususiyat beradi, biroq ularning natijasi sirtni yog‘sizlantirish, abraziv tozalash darajasi, profil balandligi, qatlam qalinligi va qotish sharoitiga keskin bog‘liq. Montemor (2014) “aqlli” qoplamalarda inhibitorni nuqson paydo bo‘lgan joyga boshqariladigan tarzda chiqarish g‘oyasini asoslagan. Keyingi tadqiqotlar nanozarrachalar, grafen hosilalari va o‘zini tiklaydigan kapsulalar yordamida qoplama ichidagi diffuziya yo‘llarini uzaytirish mumkinligini ko‘rsatmoqda, ammo zarrachalarning agregatsiyasi aksincha, elektrolit o‘tishi uchun kanallar yaratishi mumkin.

Katod himoyasi konstruksiyaning potensialini anod erishi termodinamik jihatdan cheklanadigan qiymatga siljitadi. Galvanik anodli tizimlar elektr manbasiga ehtiyoj sezmaydi va kichik yoki o‘rta obyektlar uchun sodda, biroq anod massasi tugashi va tokning muhit qarshiligiga bog‘liqligi sababli rejalashtirilgan almashtirish talab etiladi. Tashqi tok manbali tizimlar katta quvurlar, rezervuarlar va dengiz konstruksiyalarida samarali, ammo potensialni noto‘g‘ri boshqarish qoplama ajralishi, vodorod mo‘rtlashuvi yoki qo‘shni inshootlarga adashgan tok ta’sirini keltirib chiqarishi mumkin. Demak, katod himoyasi “o‘rnatib unutish” usuli emas; u doimiy potensial o‘lchovi, referens elektrodlar holati va tok taqsimotini tekshirishni talab qiladi.

Inhibitorlar muhitga nisbatan kichik konsentratsiyada qo‘shilib, anod yoki katod reaksiyasini sekinlashtiradi, metall yuzasida adsorbsion yoki cho‘kma plyonka hosil qiladi. Neft-gaz tizimlarida ularning samaradorligi pH, harorat, oqim tezligi, suv ulushi, CO_2 va H_2S miqdori, qattiq zarrachalar hamda dozalashning uzluksizligiga bog‘liq (Tamalmani & Husin, 2020). Sintetik inhibitorlar yuqori samaradorlik berishi mumkin, lekin toksiklik va chiqindi suv bilan bog‘liq cheklovlar yashil inhibitorlarga qiziqishni kuchaytirdi. O‘simlik ekstraktlari tarkibidagi fenollar, alkaloidlar, flavonoidlar va heteroatomli birikmalar metall sirtiga adsorbsiyalanib himoya qatlami hosil qiladi. Fazal et al. (2022), Sheydaei (2024) va Al-Amiery et al. (2024) bunday tizimlarda yuqori laboratoriya samaradorligi qayd etilganini, biroq ekstrakt tarkibining mavsumiy o‘zgarishi, standartlashtirish, uzoq muddatli plyonka barqarorligi va sanoat miqyosidagi dozalash masalalari hal qilinishi kerakligini ko‘rsatadi.

Material tanlash korroziya xavfini manbada kamaytiradi. Xrom, nikel va molibden bilan legirlangan po‘latlar passiv qatlam barqarorligini oshiradi; alyuminiy, titan va ayrim magniy qotishmalarida himoya oksid qatlamlari muhim rol o‘ynaydi. Biroq “korroziyaga chidamli” material mutlaq tushuncha emas. Masalan, zanglamas po‘lat xloridli tirqishlarda nuqtaviy korroziyaga, yuqori mustahkam po‘lat esa vodorod ta’sirida mo‘rtlashishga moyil. Turli metallarning bevosita tutashuvi galvanik juftlik hosil qilib, elektrokimyoviy qator bo‘yicha faolroq metallning erishini tezlashtiradi. Shuning uchun materialni faqat boshlang‘ich narxga ko‘ra emas, muhitning tarkibi, harorat, kuchlanish, payvandlash texnologiyasi va butun xizmat davri xarajatlariga ko‘ra tanlash lozim.

Monitoring va inspeksiya alohida himoya usuli emas, ammo barcha himoya choralarining ishlayotganini tasdiqlaydigan boshqaruv mexanizmidir. Vizual nazorat, ultratovushli qalinlik o‘lchovi, radiografiya, magnit oqim sizib chiqishi, kuponlar, elektr qarshilik zondlari, chiziqli polarizatsiya qarshiligi, elektrokimyoviy impedans spektroskopiyasi va masofaviy sensorlar turli vazifalarni bajaradi. Tekshiruvning chastotasi kalendar asosida emas, xavfga asoslangan inspeksiya tamoyiliga ko‘ra belgilanganda resurs eng kritik zonalarga yo‘naltiriladi. Bunda avariya ehtimoli korroziya tezligi, qolgan devor qalinligi, yuklanish, oqibat og‘irligi va aniqlash imkoniyati bilan birgalikda baholanadi.

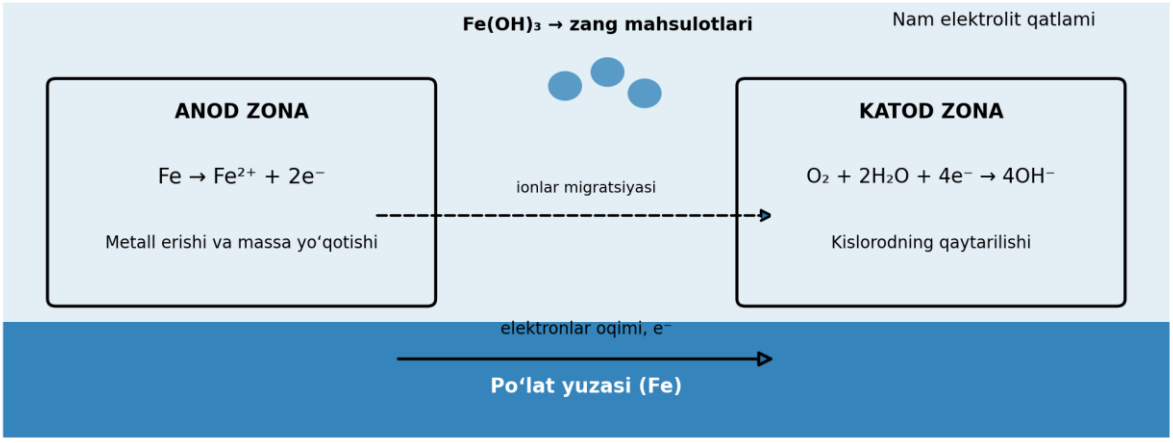
3. Natijalar va analiz

Adabiyotlar sintezi korroziya tezligini belgilovchi omillarni to‘rtta darajaga ajratish imkonini berdi. Birinchi daraja — elektrolitning mavjudligi va kimyoviy faolligi: namlik, xlorid, pH, erigan kislorod, CO_2 va H_2S. Ikkinchi daraja — issiqlik va gidrodinamika: harorat, oqim tezligi, turbulensiya, kavitatsiya va qattiq zarrachalar. Uchinchi daraja — material va konstruksiya: qotishma tarkibi, mikrostruktura, payvand choklari, tirqishlar, drenajning yetishmasligi va galvanik kontakt. To‘rtinchi daraja — boshqaruv sifati: sirt tayyorlash, qoplama qalinligi, inhibitor dozalash, katod himoyasi sozlamasi va monitoring intizomi. Oxirgi daraja ko‘pincha e’tibordan chetda qoladi, biroq amaliy nosozliklarning katta qismi texnologiyani noto‘g‘ri tanlashdan emas, uni nazoratsiz joriy etishdan kelib chiqadi.

1-jadval. Korroziya xavfini oshiruvchi omillar va nazorat ko‘rsatkichlari

Omillar guruhi	Asosiy omillar	Kutiladigan zarar shakli	Nazorat ko‘rsatkichi
Muhit	Namlik, xlorid, past pH, O_2, CO_2, H_2S	Umumiy, nuqtaviy va sulfiddan zararlanish	pH, o‘tkazuvchanlik, ionlar, gaz tarkibi
Issiqlik va oqim	Harorat, tezlik, turbulensiya, zarrachalar	Eroziya-korroziya, plyonka buzilishi	Harorat, oqim, bosim, qattiq faza
Material	Tarkib, mikrostruktura, payvand, kuchlanish	Galvanik korroziya, SCC, chok korroziyasi	Potensial, qattiqlik, chok sifati, kuchlanish
Konstruksiya	Tirqish, suv to‘planishi, yomon drenaj	Mahalliy chuqurlashuv va teshilish	Geometriya, nam zona, maksimal chuqurlik
Boshqaruv	Noto‘g‘ri sirt tayyorlash, dozani uzish	Qoplama osti va tezlashgan qayta korroziya	Qalinlik, yopishish, potensial, dozalanish

1-rasm. Po‘lat yuzasidagi elektrokimyoviy korroziya mexanizmi



Mahalliy potensial farqi, namlik va kislorod mavjudligi elektrokimyoviy korroziya zanjirini yopadi.

1-rasmda anod va katod zonalari bitta metall yuzasining o‘zida hosil bo‘lishi ko‘rsatilgan. Anod zonasida temir Fe^{2+} ioniga o‘tib, metall massasi kamayadi; elektronlar metall bo‘ylab katod zonasiga ko‘chadi va u yerda erigan kislorod gidroksid ionlarigacha qaytariladi. Fe^{2+} va OH^- ionlarining keyingi reaksiyalari gidratlangan temir oksidlari — zang mahsulotlarini hosil qiladi. Zang qatlamining hajmi dastlabki metall hajmidan katta bo‘lgani sababli u qoplama ostida bosim paydo qiladi, qatlamni ko‘taradi va yangi elektrolit kirishi uchun yo‘l ochadi. Shu tariqa qoplama nuqsoni o‘z-o‘zini tezlashtiruvchi jarayonga aylanadi.

Natijalar korroziya xavfini baholashda o‘rtacha tezlikdan tashqari zarar geometriyasini hisobga olish zarurligini ko‘rsatdi. Masalan, yiliga 0,1 mm umumiy yupqalashish 10 mm devorli rezervuar uchun sekin jarayon bo‘lishi mumkin, ammo xuddi shu o‘rtacha massa yo‘qotishi bir necha nuqtada jamlansa, qisqa vaqtda teshilish yuz beradi. Shu sababli maksimal nuqson chuqurligi, chuqurlikning vaqt bo‘yicha o‘sishi va nuqsonlarning birlashish ehtimoli o‘rtacha ko‘rsatkichdan ko‘ra muhimroq bo‘lishi mumkin. Quvur va rezervuarlar uchun ultratovush xaritalash, magnit oqim usuli yoki ichki diagnostika vositalari mahalliy nuqsonlarni aniqlashda katta ahamiyatga ega.

Himoya strategiyalarini ko‘p mezonli baholash alohida usullarning hech biri barcha mezonlar bo‘yicha maksimal natija bermasligini ko‘rsatdi. Barrier qoplamalar ko‘p turdagi tashqi muhitlarda yuqori samaradorlik va moslashuvchanlikka ega, biroq mexanik shikast va sirt tayyorlashga sezgir. Katod himoyasi yer osti va suv osti metall konstruksiyalarida kuchli, ammo quruq yoki elektrolit

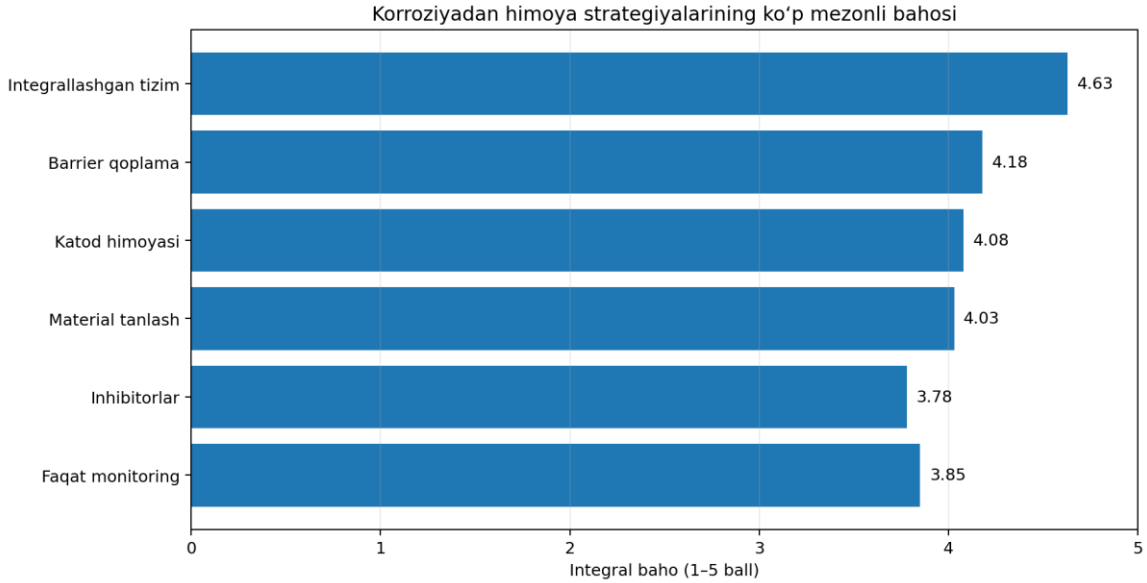
uzluksiz bo‘lmagan muhitlarda ishlamaydi. Inhibitorlar yopiq texnologik tizimlarda moslashuvchan, lekin dozalash uzilganda himoya tez yo‘qoladi. Korroziyaga chidamli material uzoq muddatli afzallik beradi, biroq boshlang‘ich kapital xarajat yuqori va noto‘g‘ri muhit tanlansa, qimmat material ham mahalliy korroziyaga uchraydi.

2-jadval. Himoya usullarining ko‘p mezonli qiyosiy bahosi

Strategiya	Mezonlar: E–D–C–A–M	Q
Faqat monitoring	3,2 – 3,8 – 4,5 – 5,0 – 4,8	3,85
Inhibitorlar	4,0 – 3,2 – 4,2 – 3,4 – 4,0	3,78
Material tanlash	4,8 – 5,0 – 2,5 – 4,0 – 3,0	4,03
Katod himoyasi	4,7 – 4,5 – 3,0 – 3,5 – 3,5	4,08
Barrier qoplama	4,5 – 4,0 – 4,0 – 3,5 – 4,5	4,18
Integrallashgan tizim	**5,0 – 5,0 – 3,5 – 4,5 – 4,5**	**4,63**

Izoh: E — texnik samaradorlik; D — xizmat muddati va barqarorlik; C — iqtisodiy maqbullik; A — ekologik xavfsizlik; M — moslashuvchanlik va nazorat qilinuvchanlik; Q — vaznli integral baho. Ballar manbalardagi afzallik va cheklovlarni qiyosiy indeksga aylantirish natijasidir.

2-rasm. Korroziyadan himoya strategiyalarining integral bahosi



2-rasmga ko‘ra, integrallashgan tizim 4,63 ball bilan eng yuqori natijani berdi. Bu ko‘rsatkich oddiy arifmetik ustunlikni emas, tizim elementlarining bir-birini to‘ldirishini ifodalaydi. Masalan, qoplama elektrolit kirishini kamaytiradi, katod himoyasi qoplamadagi kichik nuqsonlarda anod erishini cheklaydi, monitoring esa qoplama va tok tizimining haqiqiy holatini ko‘rsatadi. Himoya darajalaridan biri ishlamay qolsa, qolganlari avariya rivojlanishini sekinlashtirib, nuqsonni rejalashtirilgan inspeksiya vaqtida aniqlash imkonini beradi. Bu “chuqur himoya” tamoyili xavfsizlik muhandisligidagi ko‘p to‘siqli tizimga mos keladi.

Barrier qoplamaning 4,18 ball olishi uning ko‘p obyektlarda qo‘llanishi va nisbatan maqbul narxi bilan izohlanadi. Biroq qoplama tizimi uchun “material nomi”dan ko‘ra butun texnologik karta muhimroq: sirtning tuz va changdan tozaligi, profil, primer bilan moslik, qatlamlar orasidagi interval, quruq plyonka qalinligi, shudring nuqtasi va qotish harorati nazorat qilinmasa, yuqori sifatli mahsulot ham erta ishdan chiqadi. Qoplama osti korroziyasi ko‘pincha tashqi ko‘rinishda kech aniqlanadi; shu sababli adgeziya sinovi, holiday detector, impedans yoki boshqa noinvaziv diagnostika usullaridan foydalanish kerak.

Katod himoyasi 4,08 ball bilan yuqori samaradorlik ko‘rsatdi, ammo uning qo‘llash sohasi elektrolit mavjud bo‘lgan yer osti va suv osti obyektlari bilan chegaralanadi. Potensial juda musbat bo‘lsa himoya yetarli emas, haddan tashqari manfiy bo‘lsa qoplama ajralishi va ayrim yuqori

mustahkam qotishmalarda vodorod shikastlanishi xavfi tug‘iladi. Shu sababli loyihaviy tok zichligi muhit qarshiligi, qoplama holati va obyekt geometriyasiga mos hisoblanishi, ishga tushirishdan keyin esa “instant-off” potensiallari va adashgan toklar tekshirilishi kerak.

Material tanlash 4,03 ball oldi. Uning xizmat muddati juda yuqori bo‘lishi mumkin, lekin katta boshlang‘ich narx va qayta ishlash murakkabligi iqtisodiy mezonni pasaytirdi. Bunda hayotiy sikl xarajati yondashuvi hal qiluvchi ahamiyatga ega: arzon uglerodli po‘lat tez-tez qoplash va to‘xtashni talab qilsa, qimmatroq qotishma uzoq muddatda arzonroq chiqishi mumkin. Aksincha, oddiy, oson almashtiriladigan va korroziya tezligi past detal uchun qimmat qotishma ortiqcha kapital sarf bo‘ladi. Qaror faqat korroziya chidamliligiga emas, payvandlanuvchanlik, mexanik xossa, ta’minot va ta’mirlash imkoniyatiga ham tayangan bo‘lishi lozim.

Inhibitorlar 3,78 ball oldi. Ularning kuchli tomoni mavjud yopiq tizimga katta qayta qurishsiz joriy etilishidir; zaif tomoni esa kimyoviy tarkib va dozaga bog‘liq operatsion intizomdir. Yashil inhibitorlar istiqbolli, biroq laboratoriyada 90 foizdan yuqori samaradorlik qayd etilgani ularning sanoat sharoitida avtomatik ravishda shu natijani berishini anglatmaydi. Ekstraktning faol komponentlari partiyadan partiyaga farq qiladi, yuqori haroratda parchalanishi, oqimda yuvilishi yoki boshqa reagentlar bilan mos kelmasligi mumkin. Shu bois xomashyoni standartlashtirish, toksikologik baholash, bioyemiriluvchanlik, qoldiq miqdor va uzoq muddatli pilot sinovi majburiy bosqich bo‘lishi kerak.

4. Muhokama

Olingan natijalar korroziyadan himoya masalasida “bitta universal yechim” mavjud emasligini ko‘rsatadi. Qoplama, katod himoyasi, inhibitor va korroziyaga chidamli material turli fizik prinsip asosida ishlaydi, shu sababli ularning samaradorligi muhit va konstruksiya xususiyatiga bog‘liq. Quruq atmosfera sharoitida katod himoyasi amalda foydasiz, yopiq quvur oqimida esa qoplama ichki sirtning har bir nuqtasida tekis qalinlik hosil qilmasligi mumkin. Tirqishli detalda yuqori legirlangan material ham kislorod tanqisligi va xlorid konsentratsiyasi ortishi sababli passivligini yo‘qotadi. Demak, usulni texnik nomi bo‘yicha emas, aniq zarar mexanizmini to‘xtatish qobiliyati bo‘yicha tanlash kerak.

Tahlil qoplama tizimlaridagi asosiy muvaffaqiyatsizlik sababi mahsulot sifati emas, sirt tayyorlash va qo‘llash intizomi ekanini tasdiqlaydi. Zang, eruvchan tuz, yog‘ yoki namlik qoldig‘i qoplama ostida osmotik pufaklanish va adgeziya yo‘qolishiga olib keladi. Qatlam juda yupqa bo‘lsa, g‘ovaklik ortadi; haddan tashqari qalin bo‘lsa, ichki kuchlanish va yoriqlar paydo bo‘lishi mumkin. Shuning uchun qoplamani tanlash tenderdagi eng past narxga emas, sirt tayyorlash standarti, quruq plyonka qalinligi diapazoni, nazorat usuli va ta’mirlash protokoliga birgalikda bog‘lanishi lozim.

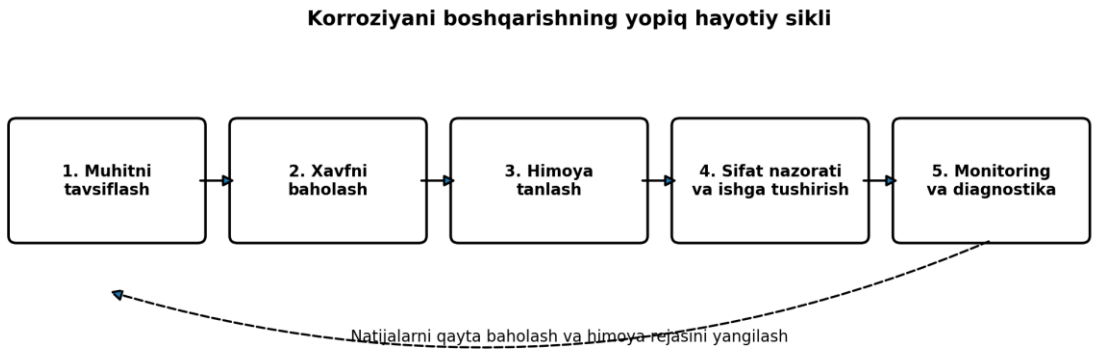
Katod himoyasida eng xavfli xato loyihaviy hisobni qoplama holatidan ajratishdir. Yangi va sifatli qoplangan quvurga kerak bo‘lgan tok bilan 15 yil xizmat qilgan, ko‘p nuqsonli qoplamaga kerak bo‘lgan tok bir xil emas. Qoplama degradatsiyasi tok talabini oshiradi, bu esa anod resursi, elektr sarfi va interferensiyani o‘zgartiradi. Himoya tizimiga masofaviy monitoring, referens elektrodlarni tekshirish va davriy tok uzish sinovlari kiritilmasa, o‘lchangan potensial kabel qarshiligi va IR pasayishi sababli noto‘g‘ri talqin qilinishi mumkin.

Inhibitorlarni qo‘llashda esa konsentratsiyani faqat laboratoriya optimumi bo‘yicha belgilash yetarli emas. Sanoat quvurida inhibitorning metall sirtiga yetib borishi oqim rejimi, fazalar ajralishi, suvning past nuqtalarda to‘planishi va qum zarrachalariga bog‘liq. Dozalash nasosi to‘xtashi yoki kimyoviy reagent omborda degradatsiyalanishi himoya plyonkasini qisqa vaqtda buzishi mumkin. Shuning uchun inhibitor dasturida qoldiq reagent tahlili, korroziya kuponi, elektr qarshilik zondi va texnologik parametrlar bir xil vaqt qatorida ko‘rilishi kerak. Bir ko‘rsatkichning yaxshilanishi tizimning barcha nuqtalari himoyalanganini isbotlamaydi.

Ekologik nuqtai nazardan yashil inhibitorlar va suv asosli qoplamalar istiqbolli, ammo “tabiiy” atamasi avtomatik ravishda xavfsiz degani emas. O‘simlik ekstrakti tarkibidagi ayrim komponentlar suv organizmlariga toksik bo‘lishi, mikrobiologik o‘sishni rag‘batlantirishi yoki keyingi ajratish jarayoniga halaqit berishi mumkin. Shuning uchun ekologik baholash xomashyoning

kelib chiqishi, ekstraksiya erituvchisi, energiya sarfi, biodegradatsiya, chiqindi va ishlatilgan mahsulotning taqdirini qamrab olgan hayotiy sikl yondashuviga asoslanishi kerak.

3-rasm. Korroziyani hayotiy sikl asosida boshqarish modeli



3-rasmdagi yopiq sikl korroziyani boshqarishning amaliy tartibini ifodalaydi. Birinchi bosqichda muhitning kimyoviy tarkibi, namlik, harorat, oqim va elektr qarshiligi aniqlanadi. Ikkinchi bosqichda zarar mexanizmi, avariya ehtimoli va oqibati baholanadi. Uchinchi bosqichda material, konstruktiv yechim, qoplama, katod himoyasi yoki inhibitorning maqbul kombinatsiyasi tanlanadi. To‘rtinchi bosqichda sirt tayyorlash, montaj, qalinlik, potensial va ishga tushirish parametrlarining sifat nazorati bajariladi. Beshinchi bosqichda esa inspeksiya va sensor ma’lumotlari loyiha taxminlari bilan taqqoslanadi. Farq aniqlansa, himoya rejasi yangilanadi; shu tariqa korroziya nazorati bir martalik xarid emas, uzluksiz boshqaruv jarayoniga aylanadi.

Taklif etilgan modelning muhim afzalligi — texnik va boshqaruv omillarini bir xil tizimga kiritishidir. Korroziya hodisasi elektrokimyoviy bo‘lsa-da, uning avariyaga aylanishi ko‘pincha ma’lumot uzilishi, mas’uliyatning bo‘linib ketishi yoki inspeksiya natijasining qaror bilan bog‘lanmasligi sababli yuz beradi. Masalan, qalinlik o‘lchovida trend yomonlashgani qayd etilsa-yu, inhibitor dozasini o‘zgartirish yoki ta’mirlash sanasini qayta ko‘rib chiqish mexanizmi bo‘lmasa, o‘lchovning o‘zi xavfni kamaytirmaydi. Shu bois korroziya ma’lumotlari aktivlar reyestri, texnik xizmat tizimi va risk boshqaruvi bilan integratsiyalanishi kerak.

Tadqiqotning cheklovi shundaki, ko‘p mezonli ballar turli material va muhitlar bo‘yicha e’lon qilingan natijalarni umumlashtiradi; ular aniq obyekt uchun tayyor loyiha qiymati sifatida ishlatilmasligi kerak. Muayyan rezervuar, quvur yoki ko‘prik uchun ballar muhit tahlili, xizmat kritikligi, ta’mirlash imkoniyati va mahalliy iqtisodiy sharoit asosida qayta kalibrlanishi lozim. Shuningdek, yashil inhibitorlar va aqlli qoplamalar bo‘yicha ko‘plab natijalar laboratoriya darajasida qolmoqda. Ularning uzoq muddatli xizmat muddati, ishlab chiqarish barqarorligi va sertifikatlash xarajatlari sanoatga joriy etishdan oldin alohida tekshirilishi zarur.

5. Xulosa

Tahlil natijalari asosida quyidagi xulosalar shakllantirildi. Birinchidan, korroziya metallning oddiy sirt nuqsoni emas, muhit, material, konstruksiya va boshqaruv sifati o‘rtasidagi o‘zaro ta’sir natijasidir. Uni faqat zangni tozalash yoki qoplamani yangilash bilan boshqarish tizimli sabablarni bartaraf etmaydi.

Ikkinchidan, xlorid, namlik, pH, erigan gazlar, harorat va oqim korroziya kinetikasini belgilasa, tirqishlar, payvand choklari, galvanik kontakt va mexanik kuchlanish mahalliy zarar ehtimolini oshiradi. Shu sababli o‘rtacha korroziya tezligi bilan bir qatorda maksimal chuqurlik, nuqson geometriyasi va o‘sish trendi nazorat qilinishi shart.

Uchinchidan, qoplama, katod himoyasi, inhibitor va material tanlashning har biri samarali, biroq aniq qo‘llash shartlari va o‘ziga xos muvaffaqiyatsizlik mexanizmiga ega. Qoplama sirt tayyorlashga, katod himoyasi tok va potensial monitoringiga, inhibitor esa dozalashning uzluksizligi va muhit tarkibiga keskin bog‘liq.

To‘rtinchidan, ko‘p mezonli baholashda integrallashgan tizim 4,63 ball bilan eng yuqori natijani ko‘rsatdi. Materialni to‘g‘ri tanlash, konstruktiv suv tutib qoluvchi zonalarni kamaytirish, qoplama, zarur hollarda elektrokimyoviy himoya va xavfga asoslangan monitoringni birlashtirish eng ishonchli strategiyadir.

Beshinchidan, ekologik xavfsiz inhibitorlar va aqlli qoplamalar katta istiqbolga ega, ammo laboratoriya samaradorligini sanoat natijasi deb qabul qilish noto‘g‘ri. Tarkibni standartlashtirish, uzoq muddatli pilot sinovi, toksikologik baholash va hayotiy sikl xarajatlari majburiy tekshiruvlardan o‘tishi lozim.

Amaliy tavsiya sifatida korxonalarda korroziya boshqaruv reyestri tuzish, kritik nuqtalar uchun o‘lchov trendlarini yuritish, qoplama va katod himoyasi sifatini qabul qilish mezonlari bilan bog‘lash hamda inspeksiya natijalaridan keyin himoya rejasini avtomatik qayta ko‘rib chiqish tartibini joriy etish taklif etiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Al-Amiery, A., Wan Isahak, W. N. R., & Al-Azzawi, W. K. (2024). Sustainable corrosion inhibitors: A key step towards environmentally responsible corrosion control. Ain Shams Engineering Journal, 15(5), 102672. https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102672

2. Ahmed, E. S. J., & Ganesh, G. M. (2022). A comprehensive overview on corrosion in reinforced concrete and its prevention using various green corrosion inhibitors. Buildings, 12(10), 1682. https://doi.org/10.3390/buildings12101682

3. AMPP. (2025). From rust to risk: Global campaign urges action on the corrosion crisis. Association for Materials Protection and Performance.

4. Fazal, B. R., Becker, T., Kinsella, B., & Lepkova, K. (2022). A review of plant extracts as green corrosion inhibitors for CO_2 corrosion of carbon steel. npj Materials Degradation, 6, Article 5. https://doi.org/10.1038/s41529-021-00201-5

5. Fontana, M. G. (1987). Corrosion engineering (3rd ed.). McGraw-Hill.

6. ISO. (2024). ISO 8044:2024: Corrosion of metals and alloys—Vocabulary. International Organization for Standardization.

7. Jones, D. A. (1996). Principles and prevention of corrosion (2nd ed.). Prentice Hall.

8. Koch, G., Varney, J., Thompson, N., Moghissi, O., Gould, M., & Payer, J. (2016). International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study. NACE International.

9. Montemor, M. F. (2014). Functional and smart coatings for corrosion protection: A review of recent advances. Surface and Coatings Technology, 258, 17–37. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.06.031

10. Ouyang, Y., Guo, E., Chen, X.-B., Kang, H., Chen, Z., & Wang, T. (2024). Recent progress in protective coatings against corrosion upon magnesium–lithium alloys: A critical review. Journal of Magnesium and Alloys, 12(10), 3967–3995. https://doi.org/10.1016/j.jma.2024.08.001

11. Revie, R. W., & Uhlig, H. H. (2008). Corrosion and corrosion control: An introduction to corrosion science and engineering (4th ed.). Wiley.

12. Roberge, P. R. (2008). Corrosion engineering: Principles and practice. McGraw-Hill.

13. Sheydaei, M. (2024). The use of plant extracts as green corrosion inhibitors: A review. Surfaces, 7(2), 380–403. https://doi.org/10.3390/surfaces7020024

14. Tamalmani, K., & Husin, H. (2020). Review on corrosion inhibitors for oil and gas corrosion issues. Applied Sciences, 10(10), 3389. https://doi.org/10.3390/app10103389

15. Verma, C., Ebenso, E. E., Bahadur, I., & Quraishi, M. A. (2018). An overview on plant extracts as environmental sustainable and green corrosion inhibitors for metals and alloys in aggressive corrosive media. Journal of Molecular Liquids, 266, 577–590. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.06.110