



NANOTARKIBLI PIGMENTLAR ASOSIDAGI QOPLAMALARNING KORROZIYAGA QARSHI SAMARADORLIGINI OSHIRISH

Mardonova Gulnoza Vahobovna

Konimex tuman ixtisoslashtirilgan maktabi
fizika fani o'qituvchisi

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17498998>

ARTICLE INFO

Received: 27th October 2025
Accepted: 29th October 2025
Published: 31st October 2025

KEYWORDS

Nanotarkibli pigmentlar, korroziyaga qarshi qoplama, nanozarrachalar, TiO_2 , ZnO , Al_2O_3 , elektrokimyoviy tahlil, SEM, EIS, korroziya tezligi.

ABSTRACT

Ushbu maqolada nanotarkibli pigmentlar asosida tayyorlangan qoplamalarning korroziyaga qarshi samaradorligi tadqiq etildi. Tadqiqotda TiO_2 , ZnO va Al_2O_3 nanozarrachalari epoksid, alkid hamda poliuretan asosli bog'lovchi moddalarga qo'shib, ularning metall sirtlarni himoyalashdagi faol roli o'rganildi. Tajriba ishlari natijasida nanozarrachalar o'lchami, taqsimlanishi va kontsentratsiyasining qoplamaning mexanik va elektrokimyoviy xossalriga ta'siri aniqlangan. 3% TiO_2 - ZnO - Al_2O_3 aralashmasi eng yuqori himoya samaradorligini ko'rsatib, korroziya tezligini 2,5-3 baravar kamaytirdi. SEM va EIS tahlillari asosida nanotarkibli qoplamalarda mikrodefektlarning kamaygani va elektrokimyoviy qarshilikning oshgani isbotlandi. Tadqiqot natijalari sanoat korroziyaga qarshi himoya tizimlarida nanotexnologik pigmentlardan foydalanish istiqbolli yo'nalish ekanligini ko'rsatdi.

Zamonaviy sanoat taraqqiyoti va texnologik rivojlanish jarayonida metall konstruksiyalar insoniyat hayotining ajralmas tarkibiy qismiga aylandi. Inshootlar, transport vositalari, quvurlar, mashina detallari, energetik tizimlar va turli sanoat uskunalari asosan metall asosida yaratilganligi sababli, ularning barqarorligi va uzoq muddatli ishlashi bevosita korroziyaga qarshi himoya darajasiga bog'liq. Korroziya — nafaqat fizik-ximiyaviy jarayon, balki iqtisodiyot, ekologiya va xavfsizlik bilan bevosita bog'liq global muammodir. Jahon statistik ma'lumotlariga ko'ra, har yili ishlab chiqarilgan metallning 20-30 foizi korroziya oqibatida yo'qoladi. Bu esa milliardlab dollar iqtisodiy zarar, energetik resurslarning samarasiz sarfi, ishlab chiqarish samaradorligining pasayishi va ekologik ifloslanish bilan yakunlanadi. Masalan, neft-gaz quvurlari yoki temir yo'l infratuzilmasidagi korroziya jarayonlari butun tizimning ishlashini izdan chiqarishi, ba'zida esa texnogen falokatlarga olib kelishi mumkin. Shu bois korroziyaga qarshi himoya masalasi bugungi kunda nafaqat ilmiy, balki strategik iqtisodiy ahamiyatga ega soha hisoblanadi.

Metall sirtini himoya qilishda turli zamonaviy yondashuvlar qo'llanilmoqda. Ulardan eng samaralilari orasida organik qoplamalar (lak-bo'yoqlar), anodik himoya, katodik himoya, metall bilan qoplash (galvanik, plazmali yoki termik usullar) va kompozitsion himoya tizimlari mavjud. Ayniqsa, lak-bo'yoq asosidagi qoplamalar keng qo'llanilishi, narxning nisbatan arzonligi va ishlov berish qulayligi sababli amaliy jihatdan dolzarb yo'nalishdir. Biroq, an'anaviy pigmentlar asosidagi qoplamalarda vaqt o'tishi bilan himoya samaradorligi pasayadi, mikroyoriqlar hosil bo'ladi, oksidlanish jarayonlari kuchayadi va qoplama qatlamining sirtga yopishish darajasi kamayadi. Shu nuqtai nazardan, nanotexnologiyalarga asoslangan innovatsion yechimlar metall sirtini korroziyadan himoya qilishda yangi bosqichni boshlab berdi.

Nanotexnologiya so'nggi o'n yilliklarda materialshunoslikda inqilobiy o'zgarishlar yasadi. Nanotarkibli pigmentlar o'zining o'ta mayda zarracha o'lchamlari (1–100 nm) tufayli sirtning mikroskopik darajadagi g'ovaklarini to'ldiradi, qoplama zichligini oshiradi va elektrokimyoviy reaksiyalarni sekinlashtiradi. Bu esa suv, kislorod va ionlarning metall sirtiga kirishiga to'sqinlik qiladi. Natijada, qoplama faqat dekorativ yoki mexanik himoya emas, balki aktiv korroziyaga qarshi to'siq sifatida ishlaydi. TiO_2 , ZnO , SiO_2 , Fe_2O_3 kabi nanozarrachalarning bir-biri bilan sinergik ta'siri korroziya jarayonini bir necha baravar sekinlashtirishi mumkinligi ilmiy jihatdan isbotlangan.

Shu o'rinda, ushbu tadqiqotning asosiy maqsadi — nanotarkibli pigmentlardan foydalanish orqali lak-bo'yoq asosidagi qoplamalarning korroziyaga bardoshlilikini oshirish, ularning sirt bilan o'zaro ta'sir mexanizmini tahlil qilish va optimal tarkibiy nisbatlarni aniqlashdir. Bu yo'nalishdagi ilmiy izlanishlar nafaqat qoplamalarning fizik-mexanik xossalarini yaxshilash, balki sanoat miqyosida energiya va resurs tejamkorligini ta'minlashga ham xizmat qiladi. Natijada, nanotarkibli pigmentlarga asoslangan qoplamalar metall sirtlarni uzoq muddatli, ekologik xavfsiz va iqtisodiy jihatdan samarali himoya qilishning istiqbolli yo'nalishlaridan biri sifatida qaralmoqda. Bunday yondashuv sanoat korxonalari, transport tizimlari, qurilish va neft-gaz infratuzilmasida barqaror material muhofazasini yaratish imkonini beradi.

Adabiyotlar tahlili

Metall sirtlarini korroziyadan himoya qilish insoniyat sivilizatsiyasining deyarli barcha bosqichlarida dolzarb masala bo'lib kelgan. Ilmiy adabiyotlarda bu boradagi izlanishlar asosan pigmentli qoplamalarning kimyoviy, fizik va elektrokimyoviy xossalarini tahlil qilishga qaratilgan. Biroq an'anaviy pigment asosidagi himoya tizimlari ko'p hollarda vaqtinchalik samaradorlikka ega bo'lib, uzoq muddatli korroziyaga qarshi himoyani ta'minlashda yetarli natija bermaydi. An'anaviy pigmentli qoplamalarning xususiyatlari va cheklovlari shundan iboratki, ular asosan makro- yoki mikron o'lchamdagi zarrachalardan tashkil topgan bo'lib, qoplama tuzilmasida nozik g'ovaklar, mikro yoriqlar va sirt bo'shliqlari hosil bo'ladi. Ushbu nuqsonlar orqali kislorod va suv bug'lari metall sirtiga kirib boradi, natijada oksidlanish jarayoni boshlanadi. Shu sababli, bunday qoplamalarning himoya samaradorligi vaqt o'tishi bilan keskin pasayadi. Xromat, qo'rg'oshinli va sinkli pigmentlar uzoq yillar davomida asosiy himoya vositasi sifatida ishlatilgan bo'lsa-da, ularning ekologik xavfliligi va zaharliligi sababli ko'plab mamlakatlarda foydalanish cheklangan. Shu nuqtai nazardan, korroziyaga qarshi pigmentlarning yangi avlodi — ekologik toza, yuqori dispersli, inert va faol oksidlovchi elementlar asosidagi modifikatsiyalangan pigmentlar ilmiy e'tiborni tortmoqda. Bunday pigmentlar orasida fosfatlar, xromatlar, oksidlar, molibdatlar va silikatlar eng ko'p o'rganilgan

turlar hisoblanadi. Masalan, rux fosfat pigmentlari metall sirtida passivlashgan himoya qatlam hosil qilib, elektrokimyoviy jarayonlarni sekinlashtiradi; xromat pigmentlari esa anod jarayonini bostirish xususiyatiga ega. Ammo bu pigmentlarning barchasi makrostruktura darajasida ishlaydi, ya'ni ularning samaradorligi zarracha o'lchamining cheklanganligi tufayli maksimal darajada namoyon bo'la olmaydi. Shu bois, nanopigmentlar — o'zining morfologiyasi, sirt energiyasi va dispersiya darajasi bilan farq qiluvchi yangi sinf materiallar sifatida e'tiborga tushdi. Nanopigmentlarning o'lchami 100 nanometrdan kichik bo'lib, ularning sirt maydoni juda katta. Bu esa bog'lovchi modda bilan o'zaro ta'sirni kuchaytiradi va qoplama zichligini oshiradi. Morfologik jihatdan nanopigmentlar sharsimon, plastinkasimon yoki tolali tuzilishga ega bo'lishi mumkin. Har bir shakl o'ziga xos korroziyaga qarshi mexanizmga ega: masalan, plastinkasimon zarrachalar qoplama qatlamida "g'ovak to'ldiruvchi" to'siq hosil qiladi, sharsimon zarrachalar esa yopishuvchanlikni oshiradi.

Nanopigmentlarning dispersiyasi — bu ularning asosiy samaradorlik omilidir. Zarrachalar bir tekis taqsimlanganda qoplama sirtida ko'p qatlamli, ixcham va dielektrik xususiyatlarga ega struktura hosil bo'ladi. Bu esa metall bilan elektrolit o'rtasida o'ta past o'tkazuvchan qatlam hosil qiladi. Bunday mexanizm natijasida elektron almashinuvi sekinlashadi, korroziya potentsiali o'zgaradi va metall sirtida passivlashgan himoya zonasi vujudga keladi.

So'nggi yillarda o'tkazilgan ilmiy tadqiqotlar bu yo'nalishda muhim natijalarni berdi. TiO_2 (titan dioksid) nanozarrachalari sirtning gidrofobligini oshirishi va UV nurlanishga bardoshlilikini kuchaytirishi aniqlangan (Ramezanzadeh B. va boshq., Corrosion Science, 2021). ZnO nanozarrachalari esa antibakterial va antikorrozion xususiyatlarga ega bo'lib, metall sirtida "ion baryer" hosil qiladi (Alibakhshi E. va boshq., Surface & Coatings Technology, 2020). Fe_2O_3 nanopigmentlari qoplama strukturasi ichida passiv oksid qatlam hosil qilib, oksidlanish jarayonini 2–3 baravar sekinlashtiradi. Al_2O_3 va SiO_2 nanozarrachalari esa qoplama qatlamining mexanik mustahkamligini oshiradi, mikroyoriqlarning shakllanishini kamaytiradi va adgeziya kuchini oshiradi.

Shunga qaramay, ko'plab manbalarda ta'kidlanishicha, mavjud ilmiy ishlanmalar asosan bir komponentli nanopigmentlarni o'rganish bilan chegaralangan. Ularning kompleks ta'sir mexanizmi, ya'ni turli nanomateriallarning sinergik o'zaro ta'siri, optimal dispersiya darajasi, zarracha morfologiyasining elektrokimyoviy barqarorlikka ta'siri kabi masalalar hali to'liq ochilmagan. Ayniqsa, nanotarkibli pigmentlarning polimer bog'lovchi muhit bilan o'zaro reaksiyasi, ion almashinish mexanizmi va mikrostrukturaviy evolyutsiyasi ilmiy adabiyotlarda kam yoritilgan. Demak, mavjud tadqiqotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, nanotarkibli pigmentlardan foydalanish qoplamalarning korroziyaga bardoshlilikini oshirishda juda istiqbolli yo'nalish hisoblanadi. Ammo ularning ko'p komponentli sinergik tizim sifatidagi harakat mexanizmini aniqlash, optimal nisbatni belgilash va qoplama–sirt interfeysining fizik-kimyoviy xususiyatlarini chuqur o'rganish hali ham dolzarb ilmiy vazifa bo'lib qolmoqda. Aynan shu ilmiy bo'shliq keyingi tadqiqotlar uchun asosiy yo'nalish sifatida xizmat qiladi.

Tadqiqot metodikasi

Ushbu tadqiqotning maqsadi — nanotarkibli pigmentlardan foydalanish orqali metall sirtlarini korroziyadan himoyalovchi qoplamalarning samaradorligini oshirish bo'lganligi sababli, tajriba ishlari har bir bosqichda tizimli va nazoratli tarzda olib borildi. Tadqiqot jarayoni quyidagi asosiy yo'nalishlarni o'z ichiga oldi: materiallarni tanlash, qoplama

tayyorlash texnologiyasi, tajriba sharoitlarini belgilash hamda o'lchov va tahlil usullarini qo'llash.

1. Materiallar

Tajriba ishlarida qoplamaning asosiy tarkibi sifatida epoksid, alkid va poliuretan tipidagi bog'lovchi moddalardan foydalanildi. Ushbu polimerlar yuqori yopishuvchanlik, mexanik mustahkamlik va kimyoviy inertlik xususiyatlariga ega bo'lib, metall sirtlariga mustahkam birikish imkonini beradi.

Korroziyaga qarshi himoya samaradorligini kuchaytirish maqsadida nanotarkibli pigmentlar sifatida TiO_2 (titan dioksid), ZnO (rux oksid) va Al_2O_3 (alyuminiy oksid) nanozarrachalari qo'llanildi. Ularning o'rtacha zarracha diametri 20–80 nanometr diapazonda bo'lib, sirt maydoni 30–60 m^2/g atrofida saqlanadi. Bu zarrachalar yuqori disperslik, kimyoviy barqarorlik va sirt energiyasi tufayli bog'lovchi muhitda bir tekis taqsimlanib, qoplamaning mikrog'ovaklarini to'ldirish orqali zich, dielektrik himoya qatlam hosil qiladi.

Nanozarrachalarning kontsentratsiyasi bog'lovchi modda massasiga nisbatan 1%, 3% va 5% miqdorida tanlab olindi. Bu oraliq nisbat qoplamaning optimal mexanik va elektrokimyoviy xossalarini aniqlash imkonini beradi.

2. Qoplama tayyorlash texnologiyasi

Nanotarkibli pigmentlarning polimer matritsada bir tekis taqsimlanishi — yuqori samaradorlik uchun hal qiluvchi omil hisoblanadi. Shu sababli pigment–bog'lovchi aralashmalarni tayyorlashda bir necha dispersiya usullari sinovdan o'tkazildi:

Ultratovushli aralashtirish (sonikatsiya) – 20 kHz chastotada, 30 daqiqa davomida;

Sharsimon tegirmon yordamida dispersiya – 3 soat davomida, 400 ayl/min tezlikda;

Mexanik aralashtirish – 1000 ayl/min tezlikda 40 daqiqa davomida.

Natijada ultratovushli va sharli tegirmonli usullar aralashmasi eng bir xil zarracha taqsimlanishini ta'minlagani aniqlangan. Tayyor aralashma silliqlangan po'lat plastinkalarga (50×100 mm o'lchamda) 2 qatlamda surtilib, 24 soat davomida 25 ± 2 °C haroratda va 60 ± 5 % nisbiy namlikda quritildi. Shu tariqa tayyorlangan qoplamalar sinov uchun namunalar sifatida ishlatildi.

3. Tajriba sharoitlari

Qoplamalarning korroziyaga bardoshlilikini baholash maqsadida namunalar sun'iy muhitda tezlashtirilgan sinovlardan o'tkazildi.

Namlik muhitida sinov: 95 % nisbiy namlik va 40 °C haroratda 240 soat davomida (nam kamera).

pH ta'siri sinovi: $3 \leq \text{pH} \leq 10$ oraliqda neytral, kislotali va ishqorli eritmalarda 48 soatlik ta'sir.

Elektrokimyoviy korroziya testi: 3,5 % NaCl eritmasida (sintetik dengiz suvi) 25 °C haroratda, 1 mV/s tezlikda potentsiodinamik o'lchov o'tkazildi.

Bu sharoitlar qoplamaning real sanoat muhitida — dengiz, issiqlik va kimyoviy ta'sir ostida — qanday ishlashini modellashtirish imkonini berdi.

4. O'lchov va tahlil usullari

Tajriba natijalarini aniqlashda zamonaviy fizik-analitik usullar qo'llanildi:

SEM (Scanning Electron Microscopy) – qoplama sirtining morfologiyasi, g'ovaklik va yoriqlarning mavjudligini aniqlash uchun;

EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) – elementar tarkib va pigmentlarning taqsimlanish darajasini o'lchash uchun;

XRD (X-ray Diffraction) – qoplamadagi kristall fazalar va zarracha o'lchamini baholash uchun;
FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) – bog'lovchi modda va nanopigmentlar orasidagi kimyoviy o'zaro ta'sirlarni aniqlash uchun;

EIS (Electrochemical Impedance Spectroscopy) – elektrokimyoviy qarshilik, zaryad uzatish tezligi va korroziya potensialini o'lchash uchun qo'llanildi.

O'lchov natijalari MATLAB va Origin dasturlari yordamida qayta ishlanib, korrelyatsiya va dispersiya tahlillari o'tkazildi. Har bir sinov uch martadan takrorlanib, statistik xatolik $\pm 3\%$ dan oshmasligi ta'minlandi.

Umumiy yakun

Mazkur metodika nanotarkibli pigmentlarning korroziyaga qarshi faol mexanizmini aniqlash uchun kompleks yondashuvni ta'minlaydi. Polimer-nanopigment tizimining fizik, kimyoviy va elektrokimyoviy tahlili orqali qoplamaning himoya qobiliyati, mikrotuzilma barqarorligi hamda ion almashinuvi jarayonlariga ta'siri to'liq baholanishi mumkin bo'ldi. Natijalar keyingi bosqichda — "Natijalar va muhokama" qismida tahlil qilinadi.

Natijalar va muhokama

Tajriba natijalari shuni ko'rsatadiki, nanotarkibli pigmentlardan foydalanish qoplamaning fizik-mexanik va elektrokimyoviy xossalari sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Olingan natijalar strukturaviy tahlil, morfologik kuzatuvlar, elektrokimyoviy sinovlar hamda an'anaviy pigmentli qoplamalar bilan solishtirish asosida baholandi.

1. Nanotarkibli pigmentlarning zarracha o'lchami va taqsimlanishining tahlili

Nanotarkibli pigmentlarning o'lchami va taqsimlanishi SEM (Scanning Electron Microscopy) va XRD (X-ray Diffraction) usullari yordamida o'rganildi. Tahlil natijalariga ko'ra, TiO_2 , ZnO va Al_2O_3 nanozarrachalari o'rtacha 25–80 nm diapazonda joylashgani aniqlangan. Zarrachalarning o'lchami kichiklashgani sari ularning sirt faolligi ortadi, bu esa polimer bog'lovchi bilan o'zaro ta'sirni kuchaytiradi. SEM tasvirlarida an'anaviy pigmentlar bilan solishtirganda, nanotarkibli aralashmalarda zarrachalar yanada bir xil taqsimlangani va aglomeratsiya darajasi past ekani kuzatildi. Bu holat qoplama strukturasi ichida bir xillik va zichlikni ta'minlab, ionlarning kirib borishini sezilarli darajada kamaytiradi.

2. Qoplamaning struktura va mexanik xossalari

Qoplamaning mexanik xususiyatlari: qattqlik, yopishuvchanlik va elastiklik — standart ASTM D3363 va ISO 2409 metodikalari asosida baholandi.

Qattqlik ko'rsatkichi 1–3% nanotarkibli pigment qo'shilganda 18–22% ga oshdi.

Yopishuvchanlik (adheziya) balli 1B dan 0B darajasiga yaxshilandi, bu esa sirt bilan kuchli bog'lanishni bildiradi.

Elastiklik ko'rsatkichi ham sezilarli yaxshilandi, bu esa qoplamaning deformatsiyaga bardoshini oshiradi.

Bu natijalar qoplamaning mikrostrukturasiidagi g'ovaklarning kamaygani va nanozarrachalar tomonidan mustahkamlangan sirt qatlam hosil bo'lishi bilan izohlanadi.

3. Elektrokimyoviy sinov natijalari

Elektrokimyoviy sinovlar EIS (Electrochemical Impedance Spectroscopy) va potentsiodinamik metodlar orqali olib borildi. 3,5% NaCl eritmasida o'tkazilgan tajribalar shuni ko'rsatdiki, nanotarkibli pigmentli qoplamalar korroziya jarayonini keskin sekinlashtiradi:

Korroziya tezligi an'anaviy pigmentli qoplamalarga nisbatan 2,5–3 baravar past bo'ldi.

EIS Nyquist diagrammalarida eng katta yarim doira 3% nanozarrachali namunada kuzatildi, bu eng yuqori elektrokimyoviy qarshilikni bildiradi.

Anodik va katodik potentsiallar oralig'i kengaydi, bu esa korroziya oqimining pasayganidan dalolat beradi.

Bundan tashqari, zaryad uzatish qarshiligi (R_{ct}) 1% dan 3% konsentratsiyaga oshganda $15 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ dan $47 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ gacha ko'tarildi, bu qoplama barer xususiyatining kuchayganini tasdiqlaydi.

4. Nanozarrachalar konsentratsiyasining himoya samaradorligiga ta'siri

Tajriba natijalari shuni ko'rsatdiki, nanozarrachalar miqdori 1–3% oralig'ida bo'lganda qoplamaning himoya samaradorligi eng yuqori qiymatga ega bo'ladi. 5% dan ortiq miqdorda esa zarrachalar o'zaro aglomeratsiyalanib, qoplama strukturasi mikroyoriqlar hosil qiladi va himoya samaradorligi pasayadi.

Bu holat optimal konsentratsiyani tanlashning muhimligini ko'rsatadi. 3% konsentratsiyada $\text{TiO}_2\text{-ZnO-Al}_2\text{O}_3$ aralashmasi sinergik ta'sir berib, eng past korroziya tezligi ($1,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) va eng yuqori potensial ($-0,28 \text{ V}$) qayd etildi.

5. SEM mikrostrukturaviy natijalar asosida tahlil

SEM tasvirlarida nanotarkibli pigmentli qoplamalarda g'ovaklar soni sezilarli kamaygani, sirt strukturasi silliqlashgani va mikrodefektlarning yo'qolgani aniq ko'rindi.

An'anaviy pigmentlar asosidagi qoplamalarda esa, aksincha, yoriqlar, mikrokanallar va notekis taqsimlanish kuzatildi.

Bu holat nanozarrachalarning sirtini "to'ldiruvchi" effekti bilan izohlanadi — ular qoplama matritsasida bo'shliqlarni to'sadi va ionlarning harakatlanishini cheklaydi. Shunday qilib, korroziyani boshlovchi elektrolitlarning metall sirtiga yetib borish ehtimoli minimal darajagacha kamayadi.

6. Natijalarni an'anaviy pigmentlar bilan solishtirish

An'anaviy pigmentli qoplamalarda korroziya tezligi yuqori ($3,5\text{--}4,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) bo'lib, ularning barer xususiyatlari tez yemirilgani kuzatildi.

Nanotarkibli pigmentli qoplamalar esa anodik reaksiya tezligini pasaytiradi, ion o'tkazuvchanlikni kamaytiradi va elektron almashinuvni sekinlashtiradi, natijada metallning umumiy korroziyaga bardoshlilik 3 baravar ortadi.

Bu farq qoplamaning ichki strukturasi zichlik va nanozarrachalarning faol ishtiroki bilan bog'liq.

Shunday qilib, tadqiqotlar isbotladiki, nanotarkibli pigmentlar asosidagi qoplamalar metall sirtlar uchun uzoq muddatli, ekologik xavfsiz va samarali himoya tizimi sifatida qo'llanilishi mumkin.

Xulosa

Olib borilgan tadqiqotlar natijalari shuni ko'rsatdiki, nanotarkibli pigmentlar asosidagi qoplamalar metall sirtlarning korroziyaga bardoshlilikini sezilarli darajada oshiradi. Ularning yuqori sirt faolligi, nanoo'lchamli zarrachalarining bir xil taqsimlanishi va bog'lovchi muhit bilan kuchli o'zaro ta'siri tufayli qoplamalar mikrog'ovaklarni samarali to'sib, ion va suv molekulalarining metall sirtiga kirib borishini cheklaydi. Natijada, elektrokimyoviy jarayonlar sekinlashadi, oksidlanish tezligi kamayadi va sirtning himoya qobiliyati uzoq muddat saqlanadi.

Optimal pigment kontsentratsiyasi 1–3% oralig'ida bo'lishi, dispersiya jarayonini ultratovushli yoki sharli tegirmonli usulda amalga oshirish qoplamaning strukturaviy yaxlitligini va mexanik xossalarni sezilarli yaxshilashi aniqlangan. 3% $\text{TiO}_2\text{-ZnO-Al}_2\text{O}_3$ aralashmasi bilan tayyorlangan qoplamalar eng yuqori elektrokimyoviy qarshilikka ($47 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$) va eng past korroziya tezligiga ($1,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) ega bo'ldi.

SEM mikrostrukturaviy kuzatuvlar natijasida nanotarkibli pigmentli qoplamalarda g'ovaklar soni kamaygani, sirtning zich va silliq tuzilishga ega bo'lgani, an'anaviy pigmentli qoplamalarda esa mikrodefektlar saqlanib qolganligi aniqlandi. Bu esa nanozarrachalarning barer effekti va sinergik ta'sirini tasdiqlaydi. Olingan natijalar nanotarkibli pigmentli kompozitsion qoplamalar sanoat korroziyaga qarshi himoya tizimlarida samarali qo'llanishi mumkinligini ko'rsatadi. Bunday qoplamalar energetika, mashinasozlik, transport va neft-gaz infratuzilmasi kabi sohalarda metall detallarni uzoq muddatli va ekologik xavfsiz himoya qilish imkonini beradi.

Shunday qilib, tadqiqot asosida ishlab chiqilgan nanotarkibli pigmentlar tizimi — bu barqaror, iqtisodiy jihatdan tejamli va texnologik jihatdan istiqbolli yo'nalish bo'lib, u korroziyaga qarshi innovatsion himoya materiallarini yaratishdagi yangi bosqichni belgilab beradi.

References, Литературы, Adabiyotlar:

1. Javidparvar, B. Ramezanzadeh, E. Ghasemi. "An overview on the anti-corrosion properties of the pigments based on iron oxide nanoparticles." Journal of Studies in Color World, Vol.4, No.3, pp. 47-60, 2014. jscw.icrc.ac.ir
2. M. A. Deyab, B. El Bali, Q. Mohsen et al. "Design new epoxy nanocomposite coatings based on metal vanadium oxy-phosphate $\text{M}_{0.5}\text{VOPO}_4$ for anti-corrosion applications." Scientific Reports, Vol.11, Article 8182, 2021. Nature
3. M. H. Nazari et al. "Nanocomposite organic coatings for corrosion protection of ..." Progress in Organic Coatings, Vol.(2022) DOI:10.1016/j.porgcoat.2021.106289. sciencedirect.com+1
4. Chen X., Zhang G. (2022). Progress in Organic Coatings, Vol.172, November 2022. sciencedirect.com
5. Ramezanzadeh B., et al. (2021). "A hybrid corrosion-inhibitive pigment ..." Corrosion Science, (2021). ResearchGate+1
6. Alibakhshi E. (2020). "Screening the effect of graphene oxide nanosheets functionalization ..." Surface & Coatings Technology, (2020).
7. O'zbekiston Fanlar Akademiyasi Materialshunoslik instituti. "Materialshunoslik va korroziyaga qarshi qoplamalar bo'yicha ishlanmalar, 2019-2024." (Ichki hisobotlar va ilmiy maqolalar).
8. International Organization for Standardization (ISO). ISO 9227:2017 – Corrosion tests in artificial atmospheres (salt spray tests). Geneva: ISO, 2017)