



## NANO O'LCHAMLI ZARRACHALAR ASOSIDA ANTIKORROZION QOPLAMALAR OLISH TEXNOLOGIYASI

**Abdulhamidova Hilola Sherzod qizi**

Termiz davlat muhandislik va agrotexnologiyalar universiteti magistranti

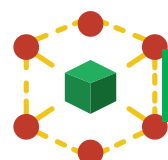
### Annotatsiya

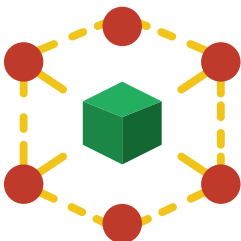
Nano o'lchamli zarrachalar asosida antikorrozion qoplamalar olish texnologiyasi zamonaviy materialshunoslik, kimyoviy texnologiya va mashinasozlik sanoatining dolzarb yo'nalishlaridan biridir. Ushbu maqolada metall buyumlarni korroziyadan himoyalashda nanozarrachalar asosidagi kompozitsion qoplamalarning ahamiyati, ularni olish texnologik bosqichlari, qo'llaniladigan nanomateriallar, polimer matritsalar, qoplama hosil qilish usullari va himoya mexanizmlari ilmiy jihatdan tahlil qilinadi. Tadqiqot mazmunida  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , grafen oksidi, nanogil, halloyzit nanotubalari va inhibitor yuklangan nanokonteynerlar asosidagi qoplamalarning metall yuzada zich, barqaror va funksional himoya qatlami hosil qilishi yoritiladi. Nanokompozit qoplamalar korroziy muhitning metall yuzaga kirib borishini sekinlashtiradi, ion va namlik diffuziyasini kamaytiradi, mikrodefektlarni to'ldiradi hamda ayrim hollarda "aqlli" yoki o'z-o'zini tiklovchi himoya xususiyatini namoyon qiladi. So'nggi ilmiy sharhlarda nanokompozit qoplamalar metall va qotishmalarni himoyalashda istiqbolli materiallar sifatida ko'rsatilgan, chunki ular oddiy passiv to'siq vazifasidan tashqari faol inhibitor ajratish, passivatsiya va o'z-o'zini tiklash mexanizmlarini ham ta'minlay oladi. ([PMC](#))

**Kalit so'zlar:** nanozarrachalar, antikorrozion qoplama, nanokompozit, korroziya, polimer matritsa, grafen oksidi, sink oksidi, titan dioksid, nanokonteyner, o'z-o'zini tiklovchi qoplama.

### Abstract

The technology of obtaining anti-corrosion coatings based on nano-sized particles is one of the current directions of modern materials science, chemical technology and mechanical engineering. This article scientifically analyzes the importance of composite coatings based on nanoparticles in protecting metal products from corrosion, the technological stages of their preparation, the used nanomaterials, polymer matrices, coating formation methods and protection mechanisms. The research highlights the formation of a dense, stable and functional protective layer on the metal surface of coatings based on  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , graphene oxide, nanoclay, halloysite nanotubes and inhibitor-loaded nanocontainers. Nanocomposite coatings slow down the penetration of corrosive media into the metal surface, reduce ion and moisture diffusion, fill microdefects and in some cases exhibit "smart" or self-healing protective properties. Recent scientific reviews have shown nanocomposite coatings as promising materials for protecting metals and alloys, as they can





provide active inhibitor release, passivation, and self-healing mechanisms in addition to their simple passive barrier function. (PMC)

**Keywords:** nanoparticles, anti-corrosion coating, nanocomposite, corrosion, polymer matrix, graphene oxide, zinc oxide, titanium dioxide, nanocontainer, self-healing coating.

## KIRISH

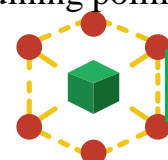
Metall materiallar sanoat, qurilish, transport, energetika, neft-gaz, kimyo sanoati va qishloq xo'jaligi texnikalarida keng qo'llaniladi. Biroq metallarning kislorod, namlik, tuzlar, kislotalar, ishqorlar va sanoat gazlari ta'sirida yemirilishi ularning xizmat muddatini qisqartiradi. Korroziya nafaqat iqtisodiy zarar keltiradi, balki texnologik uskunalarning ishdan chiqishi, konstruksion mustahkamlikning pasayishi va ekologik xavfning ortishiga ham sabab bo'ladi. An'anaviy bo'yoq, lak, galvanik qoplama va fosfatlash usullari ma'lum darajada himoya bersa-da, ular yuqori namlik, dengiz suvi, agressiv ionlar yoki harorat o'zgarishi mavjud sharoitlarda yetarlicha barqaror bo'lmasligi mumkin. Shu sababli so'nggi yillarda nano o'lchamli zarrachalar bilan modifikatsiyalangan antikorrozion qoplamalar ishlab chiqish alohida ilmiy-amaliy ahamiyat kasb etmoqda.

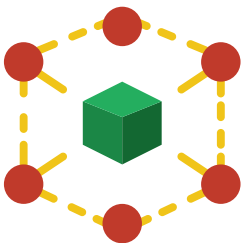
Nanozarrachalarning asosiy afzalligi ularning juda kichik o'lchamga, katta solishtirma sirt yuzasiga va yuqori reaktivlikka ega bo'lishidadir. Qoplama tarkibiga 1–100 nm o'lchamdagi zarrachalar kiritilganda polimer matritsa ichida zichroq tuzilma hosil bo'ladi. Natijada suv, kislorod, xlorid ionlari va boshqa agressiv moddalarning metall yuzasiga yetib borish yo'li murakkablashadi. Ilmiy adabiyotlarda bunday holat "tortuous pathway", ya'ni korroziy agentlar uchun egri-bugri va uzoq diffuziya yo'li hosil bo'lishi bilan izohlanadi. Nanokompozit qoplamalarning himoya samarasi aynan shu zichlashgan tuzilma, zarrachalarning to'siq effekti va metall yuzadagi adgezion mustahkamlik bilan bog'liq. ([mdpi.com](https://www.mdpi.com))

## ADABIYOTLAR TAHLILI VA METODOLOGIYA

Adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, nanozarrachalar asosidagi antikorrozion qoplamalar bir necha yo'nalishda rivojlanmoqda. Birinchi yo'nalish — oddiy passiv to'siq hosil qiluvchi nanokompozit qoplamalar bo'lib, bunda  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ , nanogil, grafen oksidi kabi zarrachalar epoksid, poliuretan, akril yoki alkid matritsaga qo'shiladi. Ikkinchi yo'nalish — faol inhibitorli qoplamalar bo'lib, ularda korroziya boshlanganda inhibitor modda ajralib chiqadi va metall yuzada himoya plyonkasi hosil qiladi. Uchinchi yo'nalish — "aqlli" qoplamalar bo'lib, ular pH, namlik, mexanik shikastlanish, ion almashinuvi yoki boshqa tashqi signallarga javoban himoya mexanizmini faollashtiradi. Smart inhibitor tizimlari bo'yicha so'nggi sharhlarda mikro va nanokonteynerlarga joylashtirilgan inhibitorlar korroziya jarayonini kechiktirish hamda qoplamaning xizmat muddatini uzaytirishda istiqbolli yechim sifatida baholanadi. ([pubs.rsc.org](https://pubs.rsc.org))

Grafen oksidi asosidagi qoplamalar alohida e'tiborga loyiq. Grafen oksidi qatlamli tuzilishga ega bo'lib, qoplama ichida agressiv ionlar harakatini sekinlashtiradi. Biroq grafen oksidining polimer





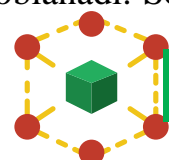
matritsada bir tekis tarqalishi muhim shart hisoblanadi. Aks holda zarrachalar aglomeratsiyalanib, qoplamada mikrobo'shliqlar paydo qilishi mumkin. Shu sababli grafen oksidi ko'pincha silanlar, polimer zanjirlar, metall oksidlari yoki korroziya inhibitorlari bilan funkcionallashtiriladi. Tadqiqotlarda grafen oksidi va sink oksidi kabi kompozit qo'shimchalar epoksid qoplamalarning himoya xususiyatlarini yaxshilashi ko'rsatilgan. ([4spublications.onlinelibrary.wiley.com](https://www.wiley.com))

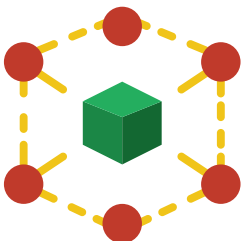
ZnO, TiO<sub>2</sub> va SiO<sub>2</sub> nanozarrachalari antikorrozion qoplamalarda eng ko'p qo'llaniladigan oksid nanomateriallar qatoriga kiradi. ZnO nanozarrachalari qoplamaning mexanik mustahkamligini, ultrabinafsha nurlanishga chidamliligini va antibakterial xususiyatini oshirishi mumkin. TiO<sub>2</sub> nanozarrachalari yuqori kimyoviy barqarorlikka ega bo'lib, qoplama yuzasida zich himoya tuzilmasini shakllantiradi. SiO<sub>2</sub> nanozarrachalari esa qoplamaning qattiqligi, ishqalanishga chidamliligi va gidrofobligini oshirishda qo'llaniladi. 2025-yilda e'lon qilingan sharhlarda ZnO, TiO<sub>2</sub>, Ag va gibrid nanozarrachalar metall korroziyasini kamaytirishda samarali bo'lishi, himoya natijasi zarracha turi, o'lchami va funkcionallashtirish darajasiga bog'liqligi qayd etilgan. ([ResearchGate](#))

Nanozarrachalar asosida antikorrozion qoplama olish texnologiyasi bir nechta ketma-ket bosqichlardan iborat. Dastlab metall yuzasi mexanik va kimyoviy tozalanadi. Bunda zang, yog', chang, oksid qatlami va eski qoplama qoldiqlari olib tashlanadi. Yuzani qum purkash, silliqlash, yog'sizlantirish, kislota yoki ishqoriy eritmalar bilan ishlov berish, keyin esa quritish amalga oshiriladi. Metall yuzaning toza va mikroqo'pol bo'lishi qoplama adgeziyasini oshiradi. Keyingi bosqichda nanozarrachalar tanlanadi va ular dispers holatga keltiriladi. Nanozarrachalarning bir tekis taqsimlanishi uchun ultratovushli disperslash, magnitli aralashtirish, yuqori tezlikda gomogenlash yoki sirt-faol moddalar yordamida barqarorlashtirish usullaridan foydalaniladi.

Qoplama tarkibini tayyorlashda polimer matritsa, nanozarrachalar, erituvchi, qotiruvchi, plastifikator, korroziya inhibitori va zarur hollarda silan bog'lovchi moddalar ma'lum nisbatda aralashtiriladi. Epoksid smolalar bunday qoplamalar uchun keng qo'llaniladi, chunki ular metall yuzaga yaxshi yopishadi, kimyoviy muhitga nisbatan chidamli va mexanik mustahkam bo'ladi. Poliuretan qoplamalar elastikligi va atmosfera ta'siriga chidamliligi bilan ajralib turadi. Akril qoplamalar esa tez qurishi va texnologik ishlov berish qulayligi bilan ahamiyatlidir. Nanozarrachalar miqdori odatda optimal chegarada tanlanadi: juda kam miqdorda ular yetarli himoya bermaydi, haddan tashqari ko'p bo'lsa, aglomeratsiya, qovushqoqlik ortishi va qoplama nuqsonlari paydo bo'lishi mumkin.

Tayyor kompozitsion aralashma metall yuzaga cho'tka bilan surish, purkash, botirish, elektroforetik cho'ktirish, spin-coating, sol-gel, plazmali purkash yoki elektrostatik purkash usullari orqali qoplanadi. Sanoat sharoitida purkash va elektrostatik qoplash usullari qulay, chunki ular katta yuzalarni bir tekis qoplash imkonini beradi. Laboratoriya sharoitida esa sol-gel, dip-coating va spin-coating usullari qoplama qalinligi va tarkibini aniq nazorat qilish uchun samarali hisoblanadi. Sol-





gel texnologiyasi ayniqsa  $\text{SiO}_2$  va  $\text{TiO}_2$  asosidagi yupqa, zich va gomogen qatlamlar olishda qo'llaniladi. Qoplama hosil qilingandan keyin quritish va qotirish jarayoni amalga oshiriladi. Qotirish harorati va vaqti polimer turiga, qoplama qalinligiga va qotiruvchi tarkibiga bog'liq.

Metodologik jihatdan bunday qoplamalarni tadqiq qilishda bir necha asosiy tahlil usullaridan foydalaniladi. Qoplama morfologiyasi skanerlovchi elektron mikroskopiya yordamida o'rganiladi. Zarrachalarning o'lchami va taqsimlanishi transmisson elektron mikroskopiya yoki dinamik yorug'lik sochilishi usullari bilan baholanadi. Qoplama tarkibi rentgen-diffraksion tahlil, infraqizil spektroskopiya va energiya-dispers rentgen spektroskopiyasi orqali aniqlanadi. Korroziyaga chidamlilik esa tuzli tuman sinovi, elektrokimyoviy impedans spektroskopiyasi, potensiodinamik polarizatsiya va 3,5% NaCl eritmasida uzoq muddatli sinovlar orqali baholanadi. So'nggi tadqiqotlarda 3,5% NaCl eritmasi antikorroziyon qoplamalarning dengiz va xloridli muhitga chidamliligini baholashda keng qo'llanilayotgan model muhit sifatida uchraydi. ([sciencedirect.com](https://www.sciencedirect.com))

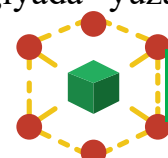
## NATIJALAR

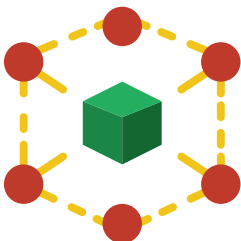
Olingan ilmiy natijalar shuni ko'rsatadiki, nanozarrachalar bilan modifikatsiyalangan qoplamalar odatiy polimer qoplamalarga nisbatan zichroq, mexanik mustahkamroq va korroziy muhitga chidamliroq bo'ladi. Buning sababi nanozarrachalar qoplama ichidagi mikroq'ovaklarni to'ldiradi, polimer zanjirlar orasidagi bo'shliqlarni kamaytiradi va agressiv ionlarning harakatlanishini cheklaydi. Agar nanozarrachalar sirtida funksional guruhlar mavjud bo'lsa, ular polimer matritsa bilan mustahkam bog'lanib, qoplamaning yaxlitligini oshiradi. Ayniqsa, grafen oksidi, nanogil va  $\text{SiO}_2$  zarrachalari qoplama ichida qatlamli yoki tarmoqli to'siq hosil qilib, suv va ionlarning metall yuzaga yetib borishini sekinlashtiradi.

Faol himoya xususiyatiga ega qoplamalarda inhibitorlar nanokapsula, halloyzit nanotubasi, mezog'ovak  $\text{SiO}_2$  yoki polimer nanokonteynerlarga joylashtiriladi. Qoplama shikastlanganda yoki lokal pH o'zgarganda inhibitor ajralib chiqib, metall yuzada himoya qatlami hosil qiladi. Bu mexanizm qoplamaning oddiy to'siq vazifasidan farq qiladi, chunki u korroziya boshlanishiga javob qaytaradi. Halloyzit nanotubalari va mezog'ovak nanozarrachalar ichki bo'shlig'i hisobiga inhibitorlarni saqlash uchun qulay tashuvchi sifatida ko'riladi; bunday tizimlarda inhibitorning nazoratsiz chiqib ketishini oldini olish uchun qo'shimcha kapsullash yoki "qopqoq" mexanizmlari qo'llanadi. ([ResearchGate](https://www.researchgate.net))

## MUHOKAMA

Muhokama nuqtayi nazaridan nanozarrachalar asosidagi qoplamalarning samaradorligi faqat nanomaterial turiga emas, balki butun texnologik zanjirning to'g'ri tashkil etilishiga bog'liq. Agar metall yuzasi yaxshi tozalanmasa, eng sifatli kompozitsiya ham yetarli adgeziya bermaydi. Agar nanozarrachalar yaxshi disperslanmasa, ular aglomerat hosil qiladi va qoplama ichida nuqson manbasiga aylanadi. Agar qoplama haddan tashqari qalin surtilsa, qurish jarayonida ichki kuchlanishlar, yoriqlar va ko'chishlar yuzaga keladi. Shuning uchun texnologiyada yuzani





tayyorlash, disperslash, komponentlar nisbatini tanlash, qoplama qalinligini nazorat qilish va qotirish rejimini optimallashtirish bir xil darajada muhim hisoblanadi.

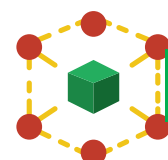
Nanozarrachalar asosidagi antikorrozion qoplamalarni sanoatga joriy etishda ekologik va iqtisodiy jihatlar ham hisobga olinishi kerak. Ayrim an'anaviy antikorrozion pigmentlar, masalan, xromat asosidagi inhibitorlar ekologik xavfliligi sababli ko'plab sohalarda cheklanmoqda. Shu sababli ekologik xavfsiz, kam zaharli va barqaror nanomateriallardan foydalanish muhim yo'nalishga aylanmoqda. Yashil sintez orqali olingan nanozarrachalar, biopolimer matritsalar, o'simlik ekstrakti asosidagi inhibitorlar va suv asosidagi qoplamalar kelajakda sanoat uchun muhim alternativ bo'lishi mumkin. 2025–2026-yillardagi sharhlarda nanomateriallar asosidagi smart qoplamalar barqaror, yuqori samarali va uzoq muddatli korroziyadan himoya beruvchi materiallar sifatida baholanmoqda. ([sciencedirect.com](https://www.sciencedirect.com))

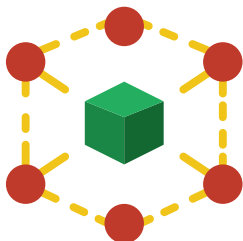
## XULOSA

Xulosa qilib aytganda, nano o'lchamli zarrachalar asosida antikorrozion qoplamalar olish texnologiyasi metall materiallarning xizmat muddatini uzaytirish, texnik xavfsizlikni oshirish va korroziya oqibatida yuzaga keladigan iqtisodiy zararlarni kamaytirish uchun istiqbolli yo'nalishdir. Bunday qoplamalar passiv to'siq, faol inhibitor ajratish, metall yuzani passivatsiyalash va o'z-o'zini tiklash kabi bir nechta himoya mexanizmlarini birlashtirishi mumkin. Qoplama samaradorligini oshirish uchun nanozarrachalarning o'lchami, shakli, sirt xususiyati, matritsada taqsimlanishi va polimer bilan mosligi chuqur o'rganilishi zarur. Eng maqbul texnologik yechim — metall yuzani sifatli tayyorlash, nanozarrachalarni barqaror disperslash, polimer matritsa bilan kimyoviy moslashtirish, optimal qalinlikda qoplash va sinovdan o'tkazishdan iborat kompleks yondashuvdir. Kelgusida ekologik xavfsiz, o'z-o'zini tiklovchi, ko'p funksiyali va sanoat miqyosida arzon ishlab chiqariladigan nanokompozit qoplamalarni yaratish antikorrozion materialshunoslikning eng muhim vazifalaridan biri bo'lib qoladi.

## FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Muresan L. M., Benea L., Iordache V. Nanocomposite Coatings for Anti-Corrosion Properties of Metallic Substrates // *Materials*. — 2023. — Vol. 16, No. 14. — Article 5092. — DOI: 10.3390/ma16145092. ([PMC](#))
2. Nazari M. H., Zhang Y., Mahmoodi A., Xu G., Yu J., Wu J., Shi X. Nanocomposite organic coatings for corrosion protection of metals: A review of recent advances // *Progress in Organic Coatings*. — 2022. — Vol. 162. — Article 106573. — DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106573. ([ResearchGate](#))
3. Zhou X., Dong Q., Wei D., Zhang Z., Ba Z., Wang Z. Smart corrosion inhibitors for controlled release: A review // *Corrosion Engineering, Science and Technology*. — 2023. — Vol. 58, No. 2. — P. 1–15. — DOI: 10.1080/1478422X.2022.2161122. ([ResearchGate](#))





4. Li D., Zhang Z., Sukhbat B., Wang X., Zhang X., Yan J., Zhang J., Zhang Q., Li Y. Smart inhibitor systems towards anti-corrosion: design and applications // RSC Applied Polymers. — 2025. — Vol. 3, No. 3. — P. 532–548. — DOI: 10.1039/D4LP00351A. ([ResearchGate](#))
5. He D., Han H., Yi M., Zhou M. Overview of smart anti-corrosion coatings and their micro/nanocontainer gatekeepers // Materials Today Communications. — 2025. — Vol. 42. — Article 111316. — DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.111316. ([ResearchGate](#))
6. Sanyal S., Park S., Chelliah R., Yeon S.-J., Barathikannan K., Vijayalakshmi S., Jeong Y.-J., Rubab M., Oh D. H. Emerging Trends in Smart Self-Healing Coatings: A Focus on Micro/Nanocontainer Technologies for Enhanced Corrosion Protection // Coatings. — 2024. — Vol. 14, No. 3. — Article 324. — DOI: 10.3390/coatings14030324. ([MDPI](#))
7. Ding C., Fu J. Smart anticorrosion coatings based on nanocontainers // Smart Nanocontainers. — 2020. — P. 413–429. — DOI: 10.1016/B978-0-12-816770-0.00024-1. ([ResearchGate](#))
8. Randis R., et al. The potential of nanocomposite-based coatings for corrosion protection of metals: A Review // Journal of Molecular Liquids. — 2023. — DOI ma'lumotlari nashriyot sahifasida keltirilgan. ([ScienceDirect](#))
9. Oreko B. U., et al. Recent Advances in Nanoparticle-Based Corrosion Inhibition of Metals: A Review // Nigerian Journal of Science and Technology Research. — 2025. — Review article. ([Milliy Mutaxassislar Instituti](#))
10. Wang M. D., et al. An intelligent anticorrosion coating based on pH-responsive smart nanocontainers fabricated via a facile method // Journal of Materials Chemistry A. — 2015. — DOI: 10.1039/C5TA00417A. ([Semantic Scholar](#))
11. Zheludkevich M. L., Shchukin D. G., Yasakau K. A., Möhwald H., Ferreira M. G. S. Anticorrosion Coatings with Self-Healing Effect Based on Nanocontainers // Chemistry of Materials. — 2007. — Vol. 19. — P. 402–411. ([ACS Publications](#))
12. Răuță D. I., et al. Recent Development of Corrosion Inhibitors: Types, Mechanisms and Applications // Technologies. — 2025. — Vol. 13, No. 3. — Article 103. ([MDPI](#))

