

**TIBBIY IMPLANTLARDA KORROZIYA VA TRIBOKORROZIYA:
BIOKOMPATIBILIK, YALLIG‘LANISH HAMDA KLINIK XAVFLARNI BOSHQARISH****КОРРОЗИЯ И ТРИБОКОРРОЗИЯ МЕДИЦИНСКИХ ИМПЛАНТАТОВ:
БИОСОВМЕСТИМОСТЬ, ВОСПАЛЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ КЛИНИЧЕСКИМИ
РИСКАМИ****CORROSION AND TRIBOCORROSION OF MEDICAL IMPLANTS:
BIOCOMPATIBILITY, INFLAMMATION, AND CLINICAL RISK MANAGEMENT****Eshkarayev Sadridin****Termiz iqtisodiyot va servis universiteti ilmiy ishlar va innovatsiyalar bo‘yicha prorektori,
k.f.f.d., dots.****sadridin_eshkarayev@tues.uz****<https://orcid.org/0000-0003-1711-3303>****Nomozov Abror****Termiz davlat muhandislik va agrotekhnologiya universiteti doktoranti****abornomozov055@gmail.com ORCID: (0000-0003-0409-8247).****Eshqorayev Samariddin****Termiz davlat muhandislik va agrotekhnologiya 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 ortopedik, stomatologik va yurak-qon tomir implantlarida uchraydigan korroziya hamda tribokorroziya jarayonlari tibbiy-biologik nuqtai nazardan tahlil qilindi. Tadqiqot 2016–2025-yillarda e‘lon qilingan birlamchi eksperimental, klinik va implant-retrieval tadqiqotlari, shuningdek ISO 10993-15:2019 standarti va FDA xavfsizlik ma‘lumotlariga tayangan strukturaviy adabiyotlar tahlili shaklida bajarildi. Natijalar passiv oksid qatlamining xloridlar, past pH, ftoridlar, biofilm, mikroharakat va ishqalanish ta‘sirida shikastlanishi metall ionlari hamda zarrachalar ajralishiga olib kelishini ko‘rsatdi. Ajralgan titan, kobalt, xrom, alyuminiy yoki vanadiy mahsulotlari oqsillar bilan kompleks hosil qilib, makrofag faollashuvi, oksidlovchi stress, sitokinlar ajralishi va peri-implant to‘qimalarda osteoliz xavfini oshirishi mumkin. Titan qotishmalari umumiy barqarorligi yuqori bo‘lsa-da, dental muhitda ftorid va kislotali pH, modulli ortopedik birikmalarda esa fretting-korroziya muhim cheklov bo‘lib qoladi. Maqolada material tanlash, galvanik juftliklarni cheklash, sirtni modifikatsiyalash va klinik monitoringni birlashtiruvchi boshqaruv modeli taklif etildi.

Kalit so‘zlar: tibbiy implant, korroziya, tribokorroziya, biokompatibilik, metall ionlari, peri-implant yallig‘lanish, osteoliz, klinik monitoring.

Аннотация

В статье с медико-биологических позиций проанализированы процессы коррозии и трибокоррозии ортопедических, стоматологических и сердечно-сосудистых имплантатов. Исследование выполнено в форме структурированного анализа первичных экспериментальных, клинических и retrieval-исследований, опубликованных в 2016–2025 годах, с учётом требований ISO 10993-15:2019 и данных безопасности FDA. Установлено, что повреждение пассивной оксидной плёнки под воздействием хлоридов, низкого pH, фторидов, биоплёнки, микродвижений и трения приводит к высвобождению ионов и частиц металла.

Продукты титана, кобальта, хрома, алюминия и ванадия способны связываться с белками, активировать макрофаги, усиливать окислительный стресс и секрецию провоспалительных цитокинов, что повышает риск остеолита и потери стабильности имплантата. Несмотря на высокую общую коррозионную стойкость титана, в стоматологии значимыми остаются фториды и кислая среда, а в модульных ортопедических соединениях — фреттинг-коррозия. Предложена модель управления риском, объединяющая подбор материала, контроль гальванических пар, модификацию поверхности и клиническое наблюдение.

Ключевые слова: медицинский имплантат, коррозия, трибокоррозия, биосовместимость, ионы металлов, периимплантное воспаление, остеолит, клинический мониторинг.

Abstract

This article examines corrosion and tribocorrosion in orthopaedic, dental, and cardiovascular implants from a biomedical perspective. The study was conducted as a structured synthesis of primary experimental, clinical, and implant-retrieval studies published between 2016 and 2025, supplemented by ISO 10993-15:2019 and FDA safety information. Evidence indicates that disruption of passive oxide films by chlorides, acidic pH, fluoride, biofilm, micromotion, and friction promotes the release of metallic ions and particles. Titanium, cobalt, chromium, aluminium, and vanadium degradation products may bind to proteins, activate macrophages, increase oxidative stress and pro-inflammatory cytokine production, and thereby contribute to peri-implant osteolysis and loss of fixation. Titanium alloys retain a favourable overall corrosion profile, but fluoride-rich acidic oral conditions remain a clinically relevant challenge, whereas modular orthopaedic junctions are vulnerable to mechanically assisted crevice corrosion and fretting. A risk-management model is proposed that integrates material selection, limitation of dissimilar-metal couples, surface engineering, manufacturing and surgical quality control, and longitudinal clinical surveillance. The model emphasises that implant corrosion is not a purely materials-science problem; it is a coupled mechanical, electrochemical, and immunological process requiring multidisciplinary management.

Keywords: medical implant, corrosion, tribocorrosion, biocompatibility, metal ions, peri-implant inflammation, osteolysis, clinical surveillance.

1. Kirish

Metall implantlar zamonaviy tibbiyotning tayanch texnologiyalaridan biridir. Titan va uning qotishmalari dental implantlar, osteosintez plastinalari va sun'iy bo'g'im komponentlarida; kobalt-xrom-molibden qotishmalari yuqori yuklanadigan bo'g'im juftliklari hamda protez elementlarida; 316L zanglamas po'lat esa vaqtinchalik fiksatorlar va ayrim jarrohlik qurilmalarida keng qo'llanadi. Ularning klinik muvaffaqiyati mexanik mustahkamlik bilan bir qatorda fiziologik muhitda kimyoviy barqarorlikka bog'liq. Qon, so'lak, to'qima suyuqligi va sinovial suyuqlik tarkibidagi xloridlar, oqsillar va hujayra viy metabolitlar sanoatdagi odatiy muhitlardan farqli, murakkab elektrolit tizimini hosil qiladi. Shu sababli laboratoriyada inert ko'ringan qotishma organizmda mikroharakat, ishqalanish, yallig'lanish va lokal pH pasayishi bilan birga tezroq degradatsiyalanishi mumkin.

Tibbiy implant korroziyasi ikki xil zarar yo'li orqali ahamiyat kasb etadi. Birinchi yo'l — konstruktiv zarar: metall kesimining kamayishi, charchoq yoriqlari, modulli birikma bo'shashishi yoki komponent sinishi. Ikkinchi yo'l — biologik zarar: erigan ionlar va nano- yoki mikroo'lchamdagi zarrachalarning oqsillar, immun hujayralar va suyak metabolizmi bilan o'zaro ta'siri. Ba'zan massa yo'qotish miqdori mexanik nuqtai nazardan kichik bo'lsa ham, biologik javob klinik jihatdan sezilarli bo'lishi mumkin. ISO 10993-15:2019 metall va qotishmalardan hosil bo'ladigan degradatsiya mahsulotlarini aniqlash hamda miqdoriy baholashni tibbiy qurilmalar biologik xavfsizligining mustaqil qismi sifatida ko'radi. Bu yondashuv korroziya tezligini o'lchashning o'zi yetarli emasligini, ajralgan mahsulotning kimyoviy shakli, miqdori va biologik ta'siri ham baholanishi kerakligini anglatadi.

Tribokorroziya — mexanik ishqalanish yoki mikroharakat bilan elektrokimyoviy korroziyaning oʻzaro kuchayuvchi kombinatsiyasidir. Harakat passiv oksid qatlamini qirib tashlaydi, metall qisqa muddat faol holatga oʻtadi, soʻng qayta passivlanadi. Ushbu sikl minglab yoki millionlab takrorlanganda, oddiy statik korroziya sinovida koʻrinmagan ion chiqishi yuzaga keladi. Sunʼiy son boʻgʻimining bosh-boʻyin taperi, yelka protezining modulli birikmasi, dental implant–abutment interfeysi va plastina–vint kontaktlari tipik xavf zonalaridir. FDA metal-on-metal son boʻgʻimi implantlarida ishqalanish hamda birikma korroziyasi natijasida kobalt va xrom zarrachalari atrof toʻqima va qon oqimiga oʻtishi, ayrim bemorlarda esa nojoʻya mahalliy toʻqima reaksiyasi, ogʻriq, boʻshashish va revizion operatsiyaga olib kelishi mumkinligini qayd etgan.

Maqolaning maqsadi tibbiy implantlarda korroziya va tribokorroziya mexanizmlarini, asosiy biomateriallarning zaif tomonlarini, metall degradatsiya mahsulotlarining biologik oqibatlarini va klinik xavfni kamaytirish choralarini bir tizimda tahlil qilishdir. Asosiy savol shundan iborat: yuqori korroziyaga chidamli deb hisoblangan biomaterial qaysi sharoitlarda biologik xavf manbaiga aylanishi mumkin va ushbu xavfni implant dizaynidan boshlab kuzatuvgacha boʻlgan hayotiy siklda qanday boshqarish kerak?

2. Tadqiqot metodologiyasi

Tadqiqot strukturaviy adabiyotlar tahlili dizaynida bajarildi. Manbalar PubMed, PubMed Central, ISO va FDA resurslaridan tanlandi. Qidiruv konsepsiyasi “medical implant corrosion”, “tribocorrosion”, “titanium particles”, “cobalt chromium ions”, “peri-implant inflammation”, “implant retrieval”, “fluoride titanium corrosion” va “biodegradable magnesium corrosion” kalit birikmalariga asoslandi. 2016–2025-yillardagi birlamchi eksperimental, klinik, case-control va implant-retrieval tadqiqotlariga ustuvorlik berildi; mexanizmning tarixiy asosini koʻrsatadigan yuqori ahamiyatli eski retrieval tadqiqotlari ham kiritildi. Faqat ikkilamchi sharhlarga tayangan daʼvolar chiqarib tashlandi yoki birlamchi manba bilan tekshirildi. Standart talablar ISO 10993-15:2019, klinik xavfsizlik nuqtalari esa FDAning metal-on-metal son implantlariga oid rasmiy maʼlumotlari bilan solishtirildi.

Har bir manbadan quyidagi maʼlumotlar ajratildi: implant turi, material, korroziv muhit, mexanik taʼsir mavjudligi, oʻlchash usuli, degradatsiya mahsulotlari, biologik javob va klinik oqibat. Elektrokimyoviy tadqiqotlarda ochiq zanjir potentsiali, potensiodinamik polarizatsiya, korroziya toki, qayta passivlanish va galvanik tok kabi koʻrsatkichlar; biologik tadqiqotlarda hujayra hayotchanligi, makrofag fenotipi, sitokinlar, histologik yalligʻlanish va osteoliz belgilari; retrieval ishlarda esa fretting, tirqish korroziyasi, korroziya mahsulotining kimyoviy tarkibi va toʻqimada tarqalishi baholandi. Sivan va hamkorlari tomonidan ASTM F2129 va F746 sinovlarining qiyoslanishi implant qotishmalarida tirqish va nuqtaviy korroziyani standartlashtirilgan baholashning metodik cheklovlarini tushuntirish uchun ishlatildi.

Natijalarni sintez qilishda toʻrtta material guruhi ajratildi: tijorat toza titan va Ti-6Al-4V, CoCrMo, 316L zanglamas poʻlat hamda bioparchalanuvchi magniy qotishmalari. Har bir guruh besh mezon boʻyicha 1–5 ballik nisbiy profil bilan tavsiflandi: passiv qatlam barqarorligi, tribokorroziyaga chidamlilik, ion chiqishi xavfining pastligi, mexanik barqarorlik va klinik nazoratning qulayligi. Bu ballar klinik prognoz yoki universal standart emas; ular manbalardagi yoʻnalishlarni vizual taqqoslash uchun mualliflik sintezi hisoblanadi. Tibbiy qaror chiqarish uchun individual implant modeli, bemor holati va mahalliy protokollar alohida baholanishi shart.

3. Adabiyotlar tahlili

Titan biomaterial sifatida havoda va fiziologik muhitda tez hosil boʻladigan TiO₂ asosidagi passiv qatlam tufayli yuqori korroziya qarshiligiga ega. Biroq passivlik mutlaq emas. Huang va hamkorlarining Ti-6Al-4V qotishmasida oʻtkazgan tajribasi ayrim ftor saqlovchi ogʻiz chayish vositalari, ayniqsa kislotali muhitda, sirt morfologiyasi va elektrokimyoviy barqarorlikni yomonlashtirishini koʻrsatgan. Dental amaliyotda bu natija “ftorid taqiqlanishi kerak” degan soddalashtirilgan xulosani bermaydi; asosiy xavf yuqori ftorid faolligi bilan past pH birgalikda paydo boʻlganda yuzaga keladi. Oqartiruvchi vositalar, bakterial kislotalar, yalligʻlangan peri-implant

choʻntak va abraziv gigiyena harakati ham passiv qatlamning qayta tiklanishiga qarshi ishlashi mumkin.

Soares va hamkorlari titan dental implantlarini CoCrMo protez komponenti bilan galvanik juftlikda tekshirgan. Tadqiqotda ochiq zanjir potentsiali, potensiodinamik va potensiostatik sinovlar hamda nol qarshilikli tok oʻlchovi qoʻllangan. Natijalar sirt ishlovi, qotishma holati va muhit galvanik xulqni sezilarli oʻzgartirishini koʻrsatadi. Muhim klinik xulosa shuki, “turli metall har doim xavfli” yoki “titan har qanday juftlikda inert” degan ikki keskin qarash ham notoʻgʻri. Galvanik xavf kontakt maydoni nisbati, elektrolit tarkibi, komponentlarning real potentsiali, sirt qoplamasi va mikroharakatga bogʻliq. Dizayn bosqichida moslik sinovi oʻtkazilmagan komponentlarni aralashtirish nazorat qilinmaydigan oʻzgaruvchilarni koʻpaytiradi.

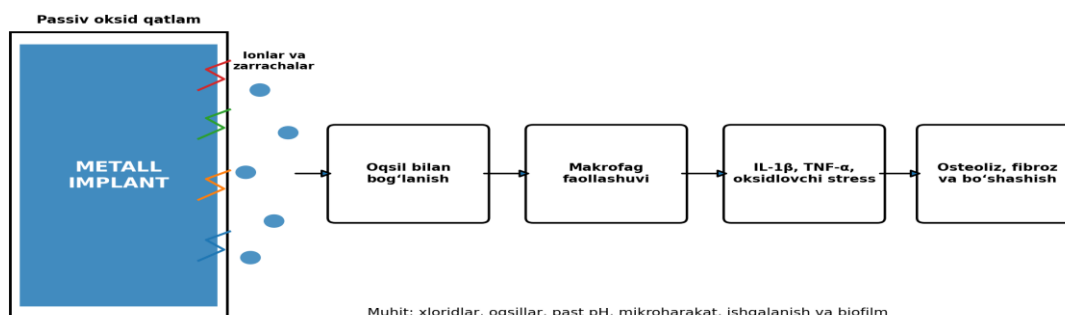
Ti-6Al-4V qotishmasida vanadiy va alyuminiyning mavjudligi ion chiqishi xavfini alohida koʻrib chiqishni talab qiladi. Costa va hamkorlari implant degradatsiyasidan kelib chiqadigan vanadiy ion turlarining hujayraviy taʼsirini baholagan va 23 μM atrofidagi vanadiy konsentratsiyasida fibroblast hayotchanligi sezilarli pasayishini qayd etgan. Ular yomon ishlayotgan qurilmali bemorlarda tasvirlangan konsentratsiyalarga yaqin darajalarda uzoq muddatli kontakt potentsial xavf tugʻdirishini koʻrsatgan. Ushbu natija implantning odatiy ishlashida albatta toksiklik yuz beradi degani emas; u passiv qatlam shikastlanganda va mahalliy toʻplanish boʻlganda kimyoviy shakl hamda ekspozitsiya davomiyligi kritik ekanini koʻrsatadi.

Metall zarrachalarining biologik faoliyati peri-implant toʻqimalarda ayniqsa muhim. Rakic va hamkorlarining case-control tadqiqotida peri-implantit granulyatsion toʻqimasida titan zarrachalari immunopatologik belgilar bilan birga baholangan. Kheder va hamkorlari esa peri-implant gingival toʻqimalarda titan zarrachalari limfotsit va makrofag polarizatsiyasini oʻzgartirishini koʻrsatgan. Ushbu ishlar korroziya mahsulotini mutlaqo biologik inert chiqindi sifatida koʻrish xato ekanini koʻrsatadi. Zarrachalar oʻlchami, sirt zaryadi, oqsil qoplami va miqdoriga qarab makrofaglar tomonidan yutiladi, M1/M2 muvozanatiga taʼsir qiladi va osteoblast–osteoklast regulyatsiyasini buzishi mumkin. Shunga qaramay, peri-implantitning yagona sababi titan zarrachalari emas: bakterial biofilm, gigiyena, chekish, metabolik omillar va protez dizayni birgalikda rol oʻynaydi.

Ortopedik implantlarda modulli birikmalar korroziyaning eng yaxshi hujjatlashtirilgan manbalaridan biridir. Urban va hamkorlari 15 ta total son protezida bosh-boʻyin birikmasidan chiqqan xromga boy korroziya mahsulotlari peri-protez toʻqimalarga tarqalganini koʻrsatgan; zarrachalar histiotsitlar va yot jism gigant hujayralari bilan bogʻliq boʻlgan hamda ayrim hollarda endosteal eroziya va boʻshashish zonalarida topilgan. Kop va hamkorlarining retrieval tadqiqotida modulli boʻyin–stem interfeysida fretting va tirqish korroziyasi, ayniqsa CoCrMo komponentlarda, klinik muammoga aylanishi mumkinligi koʻrsatilgan. Eckert va hamkorlarining yelka protezlari retrieval tahlili ham modulli interfeyslarning tribokorroziyaga moyilligini tasdiqlagan. Bu dalillar konstruktiv qoʻshimcha modul jarrohlik moslashuvchanligini oshirsa-da, yangi elektrokimyoviy va mexanik interfeys yaratishini koʻrsatadi.

CoCrMo qotishmalari yuqori qattqlik va yeyilishga chidamlilik tufayli boʻgʻim protezlarida muhim, ammo kobalt va xrom ionlarining biologik xavfi kuzatuvni talab qiladi. FDA metal-on-metal tizimlarda ishqalanish va taper korroziyasi natijasida metall zarrachalari hamda ionlar qon oqimiga oʻtishi, ayrim bemorlarda nojoʻya mahalliy toʻqima reaksiyasi va revizion operatsiyaga ehtiyoj tugʻdirishi mumkinligini koʻrsatadi. Tsai va hamkorlari CoCrMo yuzasiga TiSiN va ZrN qattiq qoplamalarini qoʻllab, simulyatsiyalangan tana suyuqligida bir million siklli fretting sinovida hajmiy yeyilishni keskin kamaytirgan va kobalt ion chiqishini qariyb 90 foiz pasaytirgan. Bu natija sirt muhandisligining imkoniyatini koʻrsatadi, ammo qoplamaning klinik samarasi yopishish, nuqsonlar, charchoq va uzoq muddatli delaminatsiya xavfi bilan birga baholanishi kerak.

1-rasm. Implant korroziyasi va peri-implant yallig'lanishining bog'langan mexanizmi



1-rasmda passiv qatlamning mexanik yoki kimyoviy buzilishidan boshlab osteoliz va implant bo'shashigacha bo'lgan zanjir ko'rsatilgan. Ushbu sxema sababiyatni bir yo'nalishli deb talqin qilmaydi: yallig'lanish pHni pasaytirib va oksidlovchi muhitni kuchaytirib korroziyani tezlashtirishi, korroziya mahsulotlari esa immun javobni kuchaytirishi mumkin. Natijada musbat qayta aloqa hosil bo'ladi.

4. Natijalar va tahlil

Tahlil qilingan manbalar tibbiy implant korroziyasini beshta o'zaro bog'langan darajaga ajratish mumkinligini ko'rsatdi: material darajasi, sirt darajasi, konstruktiv interfeys, biologik mikro-muhit va klinik boshqaruv. Material darajasida qotishma tarkibi, fazalar va inklyuziyalar galvanik mikroelementlar yaratadi. Sirt darajasida oksid qatlam qalinligi, ifloslanish, qo'pollik va qoplama nuqsonlari muhim. Interfeys darajasida tirqish, taper, vint va kontakt bosimi kislorod almashinuvini cheklaydi. Biologik muhit darajasida xlorid, oqsil, hujayralar, biofilm va yallig'lanish metabolitlari korroziya mahsulotining kimyoviy shaklini o'zgartiradi. Klinik darajada komponent tanlash, jarrohlik montaji, yuklanish, gigiyena va kuzatuv tizimi xavfning yakuniy oqibatini belgilaydi.

1-jadval. Asosiy tibbiy metallarning korroziya profili va klinik cheklovlari

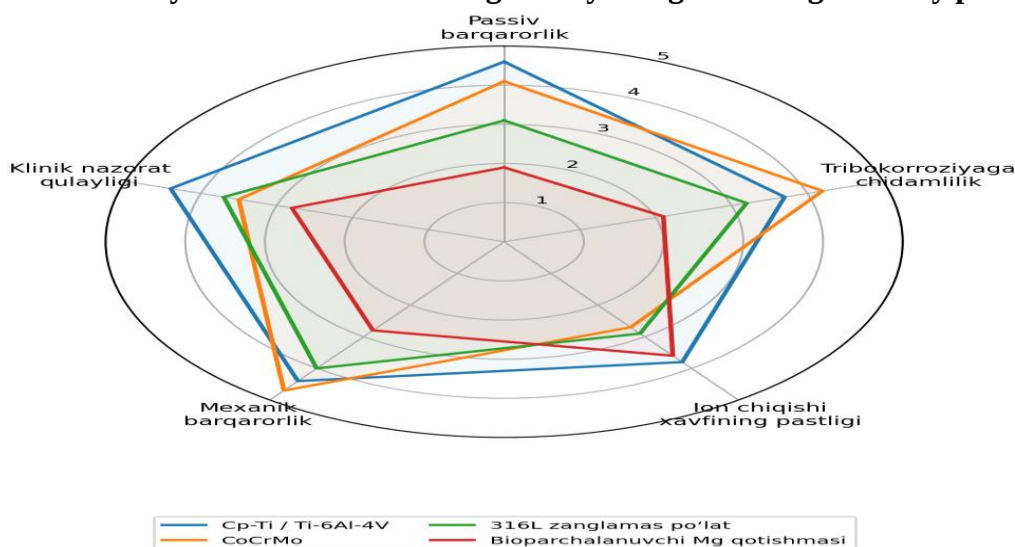
Material	Asosiy qo'llanish	Ustunlik	Korroziya cheklovi	Asosiy boshqaruv
Cp-Ti / Ti-6Al-4V	Dental implant, plastina, stem	Yuqori passivlik, yaxshi osteointegratsiya	Ftorid-past pH, fretting, Ti/Al/V mahsulotlari	Mos komponent, sirt va gigiyena nazorati
CoCrMo	Bo'g'im boshchasi, protez karkasi	Yuqori qattiqlik va yeyilish chidami	Taper korroziyasi, Co/Cr ionlari, ALTR	Interfeys dizayni, montaj, simptomga asoslangan kuzatuv
316L po'lat	Vint, plastina, vaqtinchalik fiksator	Arzon va mexanik ishlovi qulay	Tirqish/nuqtaviy korroziya, Ni/Cr chiqishi	Vaqtinchalik qo'llanish va sirt sifati
Mg qotishmasi	Bioparchalanuvchi fiksator	Ikkinchi operatsiyani kamaytirish imkoniyati	Tez degradatsiya, H ₂ , erta mustahkamlik yo'qolishi	Qotishma va qoplama orqali tezlikni moslash

1-jadval titan qotishmalarining ko'p holatda eng muvozanatli biomaterial ekanini, ammo barcha klinik stsenariylar uchun avtomatik tanlov emasligini ko'rsatadi. CoCrMo kuchli va yeyilishga chidamli, lekin modulli birikmalardagi kobalt-xrom chiqishi biologik nazoratni talab qiladi. Zanglamas po'latning iqtisodiy afzalligi uzoq muddatli xloridli muhitda passiv qatlam barqarorligining pastroq bo'lishi bilan cheklanadi. Magniy qotishmalarida esa korroziya butunlay

salbiy hodisa emas: maqsad implantning suyak bitishi bilan muvofiq tezlikda boshqariladigan parchalanishidir. Muammo korroziyaning juda tez yoki notekis kechishi, vodorod to'planishi va mexanik tayanchning erta yo'qolishidir.

Li va hamkorlari Mg, Mg-3Zn va Mg-2Zn-1Mn tizimlarini in vitro va in vivo baholab, Mg-2Zn-1Mn qotishmasida nisbatan barqaror degradatsiya, yaxshi histomoslik va osteogenezni rag'batlantiruvchi ta'sirni qayd etgan. Bazhenov va hamkorlari Mg-Zn-Ga-(Y) qotishmalarida tarkib va issiq ekstrudirlash korroziya tezligi hamda biokompatibilikka ta'sir qilishini ko'rsatgan. Bu natijalar "ko'proq korroziya — yomonroq" paradigmasi bioparchalanuvchi implantlarga to'liq mos kelmasligini anglatadi. Bu yerda optimal ko'rsatkich — biologik bitish tezligiga mos, oldindan prognoz qilinadigan va lokal toksikliksiz degradatsiyadir.

2-rasm. Tibbiy metall materiallarning adabiyotlarga asoslangan nisbiy profili



2-rasmdagi profil mualliflik sintezi bo'lib, universal reyting emas. Titan tizimlari passiv barqarorlik, mexanik xususiyatlar va klinik tajriba bo'yicha yuqori muvozanat ko'rsatadi. CoCrMo tribologik va mexanik jihatdan kuchli, biroq ion chiqishi bilan bog'liq biologik xavf nisbatan yuqori. 316L po'lat ko'plab vaqtinchalik fiksatsiya vazifalarini bajaradi, ammo xloridli va tirqishli sharoitda nuqtaviy korroziyaga moyil. Magniy qotishmalarida past passiv barqarorlik ataylab yaratilgan funksional xususiyat bo'lishi mumkin, lekin degradatsiya kinetikasini nazorat qilish qiyin.

2-jadval. Korroziya xavfini oshiruvchi klinik omillar va profilaktik choralar

Xavf omili	Mexanizm	Kutiladigan oqibat	Minimal zarur chora
Past pH va ftoridli oral muhit	TiO ₂ qatlamining erishi va qayta passivlanishning sekinlashuvi	Titan ionlari/zarrachalari, sirt qo'pollashuvi	Ftorid konsentratsiyasi va pHni hisobga olgan gigiyena vositasi
Modulli interfeysdagi mikroharakat	Fretting + tirqish korroziyasi	Co/Cr yoki Ti mahsulotlari, bo'shashish	Komponent mosligi, tozaligi, montaj kuchi va dizayn nazorati
Biofilm va yallig'lanish	Kislotalar, ROS va lokal kislorod farqi	Musbat qayta aloqa: korroziya–yallig'lanish	Infeksiya profilaktikasi, gigiyena va erta peri-implant terapiya
Turli metall komponentlari	Galvanik potensial farqi	Mahalliy tok va anod erishi	Ishlab chiqaruvchi tasdiqlagan metall juftliklari

Qoplama nuqsoni yoki delaminatsiya	Kichik anod–katta katod nisbatida lokal korroziya	Nuqtaviy shikast va zarracha chiqishi	Yopishish, charchoq va sterilizatsiyadan keyingi sifat nazorati
------------------------------------	---	---------------------------------------	---

Natijalar xavfni kamaytirish uchun bitta “eng yaxshi qotishma” yetarli emasligini ko‘rsatadi. Masalan, yuqori sifatli titan implant noto‘g‘ri protez komponenti bilan galvanik yoki mexanik interfeys hosil qilsa, afzalligining bir qismi yo‘qoladi. Xuddi shuningdek, qattiq PVD qoplama laboratoriyada ion chiqishini kamaytirishi mumkin, biroq klinik yuklanishda mikroyoriq yoki qirra delaminatsiyasi yuz bersa, kichik nuqson atrofida lokal korroziya kuchayadi. Shuning uchun biomaterial, sirt, dizayn va jarrohlik protsedurasi alohida emas, yagona tizim sifatida verifikatsiya qilinishi kerak.

Korroziya monitoringida umumiy qon yoki siydikdagi metall ionini yagona diagnostik mezon sifatida ishlatish ham zaif yondashuvdir. Ion darajasi implant turi, ikki tomonlama protez, buyrak funksiyasi, vaqt, laboratoriya usuli va tashqi ekspozitsiyaga bog‘liq. Klinik simptom, fizik tekshiruv, seriyali radiologiya, yumshoq to‘qima tasvirlash va implant modelining ma‘lum xavf profili birgalikda talqin qilinishi kerak. FDA ham metal-on-metal implantlarda bir xil laboratoriya chegarasi barcha bemorlarda to‘qima reaksiyasini oldindan aniq aytib bermasligini ta‘kidlaydi.

5. Muhokama

Tibbiy implant korroziyasini muhokama qilishda eng katta metodologik xato in vitro korroziya tezligini to‘g‘ridan-to‘g‘ri klinik muvaffaqiyatsizlik bilan tenglashtirishdir. Elektrokimyoviy kamera muhitni nazorat qiladi, lekin organizmdagi oqsil adsorbsiyasi, hujayra faolligi, qon oqimi, to‘qima tamponlash qobiliyati va mikroharakat spektrini to‘liq takrorlamaydi. Aksincha, retrieval implant faqat reviziya yoki o‘limdan keyingi tanlangan holatlarni ko‘rsatadi va umumiy populyatsiyaga nisbatan og‘ir holatlarni ortiqcha aks ettirishi mumkin. Eng kuchli xulosa elektrokimyoviy, biologik, retrieval va klinik kuzatuv natijalari bir yo‘nalishda kelganda olinadi.

Dental implantlarda korroziya va peri-implantit o‘rtasidagi sabab–oqibat munosabati ayniqsa murakkab. Bakterial biofilm yallig‘lanishni boshlashi, yallig‘langan muhit TiO₂ qatlamini zaiflashtirishi, ajralgan zarrachalar esa makrofag va osteoklast signalini kuchaytirishi mumkin. Shunday qilib, titan zarrachasini faqat sabab yoki faqat natija sifatida tasniflash noto‘g‘ri. Klinik strategiya biofilm nazorati, yumshoq to‘qima muhrini saqlash, protezning gigiyenik dizayni va korroziv kimyoviy vositalarni oqilona tanlashni birlashtirishi kerak. Implantoplastika kabi mexanik muolajalar sirt zarrachalarini hosil qilishi mumkinligi sababli, protsedura foydasi va zarracha chiqarish xavfi alohida baholanishi lozim.

Ortopedik modullik masalasida ham aniq trade-off mavjud. Modulli stem va bo‘yin jarrohga anatomiyani yaxshiroq tiklash imkonini beradi, lekin har bir qo‘shimcha konus interfeysi fretting, tirqish va galvanik korroziya ehtimolini oshiradi. Interfeys xavfi faqat metall turiga emas, kontakt geometriyasi, sirtning mexanik ishlovi, montaj zarbasi, kontaminatsiya va bemor yuklanishiga bog‘liq. Demak, “bir xil metall xavfsiz, turli metall xavfli” qoidasi yetarli emas. Urban, Kop va Eckert tadqiqotlari real qurilmada mikroharakat va tirqish kimyosi tarkib bir xil bo‘lganda ham korroziya yuz berishini ko‘rsatadi.

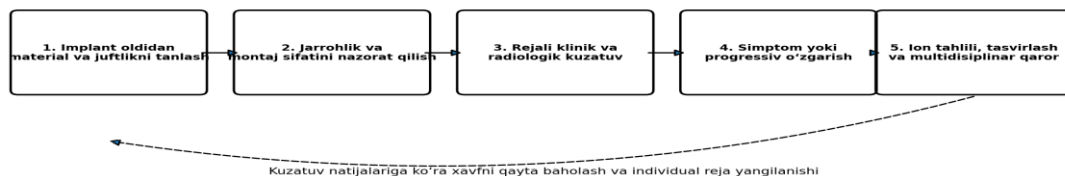
Sirt modifikatsiyasi istiqbolli, ammo u material muammosini yashiruvchi kosmetik qatlamga aylanmasligi kerak. TiSiN, ZrN, oksidlangan qatlamlar, gidroksiapatit va boshqa qoplamalar ion chiqishi, ishqalanish va osteointegratsiyani yaxshilashi mumkin. Biroq qoplamaning qalinligi, qoldiq kuchlanishi, sterilizatsiyaga chidamliligi, mikroteshiklar va substrat bilan elastik mosligi tekshirilmasa, uzoq muddatli charchoqda qatlam ajralishi mumkin. Tsai va hamkorlarining tajribasi qattiq qoplamalar fretting yo‘qotishi va kobalt chiqishini keskin kamaytirishini ko‘rsatadi, lekin klinik joriy etish uchun millionlab sikldan tashqari chekka yuklanish, impingement va kimyoviy qarish sinovlari ham zarur.

Bioparchalanuvchi magniy implantlari korroziyaga mutlaqo boshqa dizayn falsafasini olib kiradi. Doimiy implantlarda maqsad korroziyani minimumga tushirish bo‘lsa, Mg tizimida maqsad degradatsiyani suyak bitishi tezligi bilan sinxronlashtirishdir. Juda tez erish gaz cho‘ntaklari, pH

o'zgarishi va erta mustahkamlik yo'qolishiga; juda sekin erish esa ikkinchi operatsiyani kamaytirish maqsadini yo'qqa chiqarishga olib keladi. Li va Bazhenov ishlarida tarkib va mikrostruktura orqali degradatsiya boshqarilishi mumkinligi ko'rsatilgan, ammo hayvon modelidan inson yuklanishiga o'tishda masshtab, qon ta'minoti va implant hajmi katta noaniqlik yaratadi.

Tadqiqotning cheklovi — kiritilgan ishlar implant turi, sinov muhiti va natija ko'rsatkichlari bo'yicha heterogen. Nisbiy profil ballari formal meta-tahlil emas va material xaridi yoki individual bemor uchun tayyor qaror vositasi sifatida ishlatilmasligi kerak. Shuningdek, metall ionlarining sistemik ta'siri bo'yicha sababiyat ko'pincha mahalliy to'qima reaksiyasiga qaraganda zaifroq hujjatlashtirilgan. Shu sababli maqola korroziya xavfini ortiqcha dramatizatsiya qilmaydi: ko'pchilik implantlar klinik jihatdan muvaffaqiyatli xizmat qiladi, ammo xavfli interfeys va simptomli bemorda degradatsiya ehtimolini inkor etish ham asosli emas.

3-rasm. Implant korroziyasi xavfini klinik boshqarishning yopiq sikli



3-rasm implantning hayotiy sikli bo'yicha minimal boshqaruv mantiqini ifodalaydi. Birinchi bosqichda implant vazifasi, yuklanish va bemorning allergik, buyrak, metabolik hamda infeksiyon xavflari hisobga olinib material va komponent juftligi tanlanadi. Ikkinchi bosqichda komponent sirtining tozaligi, ishlab chiqaruvchi mosligi, taper yoki vintning montaj tartibi va jarrohlik kontaminatsiyasi nazorat qilinadi. Uchinchi bosqichda klinik va radiologik bazaviy ma'lumotlar qayd etilib, implant turiga mos kuzatuv belgilanadi. To'rtinchi bosqichda og'riq, shish, funksiyaning pasayishi, peri-implant suyak yo'qolishi yoki noma'lum massaga o'xshash o'zgarish aniqlansa, xavf qayta tasniflanadi. Beshinchi bosqichda metall ion tahlili, ultratovush/MRI yoki boshqa mos tasvirlash usuli, infeksiya diagnostikasi va mexanik baholash birga ko'rib chiqiladi.

Mazkur algoritmning asosiy tamoyili — laboratoriya natijasini bemordan ajratmaslik. Normal yoki past ion darajasi mexanik bo'shashishni inkor etmaydi, yuqori daraja esa o'z-o'zidan revizion operatsiya ko'rsatmasi emas. Qaror simptom dinamikasi, tasvirlash, implant modeli, komponent pozitsiyasi va to'qima zarari bilan birgalikda qabul qilinadi. Progressiv nojo'ya mahalliy to'qima reaksiyasida erta reviziya keng suyak, mushak va nerv shikastlanishining oldini olishi mumkinligi FDA ma'lumotlarida qayd etilgan, ammo bunday qaror ortoped, radiolog, laboratoriya mutaxassisi va zarur hollarda toksikolog ishtirokida individual ravishda chiqariladi.

6. Xulosa

Birinchidan, tibbiy implant korroziyasi elektroximik jarayonning o'zi emas; u mexanik mikroharakat, passiv qatlam shikasti va immun-biologik javob bilan bog'langan tribokorroziya tizimidir. Konstruktiv massa yo'qotishi kichik bo'lsa ham, lokal ion va zarracha konsentratsiyasi klinik ahamiyat kasb etishi mumkin.

Ikkinchidan, titan va uning qotishmalari umumiy hisobda qulay korroziya–biokompatibilik profiliga ega, biroq past pH, ftorid, biofilm va implant–abutment mikroharakati ularning passivligini zaiflashtiradi. Ti-6Al-4V degradatsiyasida alyuminiy va vanadiy mahsulotlari ham hisobga olinishi kerak.

Uchinchidan, CoCrMo va modulli ortopedik interfeyslar yuqori mexanik samaradorlik evaziga fretting, tirqish korroziyasi hamda kobalt-xrom ion chiqishi xavfini olib keladi. Modullikni kamaytirish, komponent mosligi, taper tozaligi va montaj sifati material tanlashning o'zi kabi muhim.

Toʻrtinchidan, qoplama va sirt modifikatsiyasi ion chiqishini kamaytirishi mumkin, ammo nuqson, delaminatsiya va charchoq xavfi uzoq muddatli sinov bilan tekshirilishi shart. Bioparchalanuvchi magniy implantlarida esa maqsad korroziyani toʻxtatish emas, uni suyak bitishi bilan moslashtirishdir.

Beshinchidan, eng samarali boshqaruv modeli implant dizayni, material va metall juftligini tanlash, ishlab chiqarish hamda jarrohlik sifat nazorati, infeksiya profilaktikasi va individual klinik monitoringni yagona siklga birlashtiradi. Bir martalik ion tahlili yoki bitta tasvirlash natijasi emas, vaqt boʻyicha trend va multidisiplinar baholash klinik qarorning asosini tashkil etishi kerak.

Amaliy tavsiya sifatida tibbiyot muassasalarida implantning ishlab chiqaruvchi modeli, metall tarkibi, komponent juftligi va seriya maʼlumotlarini bemor kartasida saqlash; simptomli holatlarda infeksiya, mexanik boʻshashish va korroziya reaksiyasini parallel tekshirish; dental amaliyotda esa ftoridli vositaning konsentratsiyasi va pHni implant yuzasi holati bilan hisobga olish taklif etiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Bazhenov, V., Li, A., Iliasov, A., Bautin, V., Plegunova, S., Kolytgin, A., Komissarov, A., Abakumov, M., Redko, N., & Shin, K. S. (2022). Corrosion behavior and biocompatibility of hot-extruded Mg–Zn–Ga–(Y) biodegradable alloys. *Journal of Functional Biomaterials*, 13(4), 294. <https://doi.org/10.3390/jfb13040294>
2. Costa, B. C., Tokuhara, C. K., Rocha, L. A., Oliveira, R. C., Lisboa-Filho, P. N., & Pessoa, J. C. (2019). Vanadium ionic species from degradation of Ti-6Al-4V metallic implants: In vitro cytotoxicity and speciation evaluation. *Materials Science and Engineering: C*, 96, 730–739. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.11.090>
3. Eckert, J. A., Mueller, U., Jaeger, S., Panzram, B., & Kretzer, J. P. (2016). Fretting and corrosion in modular shoulder arthroplasty: A retrieval analysis. *BioMed Research International*, 2016, 1695906. <https://doi.org/10.1155/2016/1695906>
4. Food and Drug Administration. (2019). Concerns about metal-on-metal hip implants. U.S. Food and Drug Administration.
5. Huang, G.-Y., Jiang, H.-B., Cha, J.-Y., Kim, K.-M., & Hwang, C.-J. (2017). The effect of fluoride-containing oral rinses on the corrosion resistance of titanium alloy (Ti-6Al-4V). *The Korean Journal of Orthodontics*, 47(5), 306–312. <https://doi.org/10.4041/kjod.2017.47.5.306>
6. International Organization for Standardization. (2019). ISO 10993-15:2019: Biological evaluation of medical devices—Part 15: Identification and quantification of degradation products from metals and alloys. ISO.
7. Kheder, W., Bouzid, A., Venkatachalam, T., Talaat, I. M., Elemam, N. M., Raju, T. K., Sheela, S., Jayakumar, M. N., Maghazachi, A. A., Samsudin, A. R., & Hamoudi, R. (2023). Titanium particles modulate lymphocyte and macrophage polarization in peri-implant gingival tissues. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(14), 11644. <https://doi.org/10.3390/ijms241411644>
8. Kop, A. M., Keogh, C., & Swarts, E. (2012). Proximal component modularity in THA—At what cost? An implant retrieval study. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 470(7), 1885–1894. <https://doi.org/10.1007/s11999-011-2155-9>
9. Kowalski, J., Rylska, D., Januszewicz, B., Konieczny, B., Cichomski, M., Matinlinna, J. P., Radwanski, M., Sokolowski, J., & Lukomska-Szymanska, M. (2023). Corrosion resistance of titanium dental implant abutments: Comparative analysis and surface characterization. *Materials*, 16(20), 6624. <https://doi.org/10.3390/ma16206624>
10. Li, D., Zhang, D., Yuan, Q., Liu, L., Li, H., Xiong, L., Guo, X., Yan, Y., Yu, K., Dai, Y., Xiao, T., Li, Y., & Wen, C. (2022). In vitro and in vivo assessment of the effect of biodegradable magnesium alloys on osteogenesis. *Acta Biomaterialia*, 141, 454–465. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2021.12.032>
11. Rakic, M., Radunovic, M., Petkovic-Curcin, A., Tatic, Z., Basta-Jovanovic, G., & Sanz, M. (2022). Study on the immunopathological effect of titanium particles in peri-implantitis

granulation tissue: A case-control study. *Clinical Oral Implants Research*, 33(6), 656–666.
<https://doi.org/10.1111/clr.13928>

12. Sivan, S., Rahman, E., Weaver, J. D., & Di Prima, M. (2019). Comparison of ASTM F2129 and ASTM F746 for evaluating crevice corrosion. *Journal of Testing and Evaluation*, 47(4), 2497–2511. <https://doi.org/10.1520/JTE20180585>

13. Soares, F. M. S., Elias, C. N., Monteiro, E. S., Coimbra, M. E. R., & Santana, A. I. C. (2021). Galvanic corrosion of Ti dental implants coupled to CoCrMo prosthetic component. *International Journal of Biomaterials*, 2021, 1313343. <https://doi.org/10.1155/2021/1313343>

14. Tsai, C.-E., Hung, J., Hu, Y., Wang, D.-Y., Pilliar, R. M., & Wang, R. (2021). Improving fretting corrosion resistance of CoCrMo alloy with TiSiN and ZrN coatings for orthopedic applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 114, 104233. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2020.104233>

15. Urban, R. M., Jacobs, J. J., Gilbert, J. L., & Galante, J. O. (1994). Migration of corrosion products from modular hip prostheses: Particle microanalysis and histopathological findings. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*, 76(9), 1345–1359. <https://doi.org/10.2106/00004623-199409000-00009>