

OPTIK TOLALI SENSORLARNING EKSTREMAL SHAROITLARDA ISHLASH BARQARORLIGINI OSHIRISH VA MEXANIK SHIKASTLANISHLAR VA UZILISHLARNING OLDINI OLISH TEXNOLOGIYALARI

Axmadxonov Afzaliddin Abduvosi o'g'li

O'zbekiston Respublikasi Jamoat xavfsizligi universiteti

“Axborot texnologiyalari” kafedrası o'qituvchisi

Annotatsiya: Ushbu maqolada optik tolali sensorlarning (OTS) ekstremal sharoitlarda — yuqori harorat, kuchli mexanik bosim, tebranishlar va kimyoviy agressiv muhitlarda ishlash barqarorligini oshirish masalalari tahlil qilinadi. Optik tolalarning asosiy qismi bo'lgan silikat shishasining mo'rtligi ularning amaliyotda uzilishi va mikrobukilishlarga moyilligini keltirib chiqaradi. Maqolada mexanik shikastlanishlarning oldini olishga qaratilgan zamonaviy himoya qoplamalari, tolalarni qadoqlash arxitekturalari hamda signallarni yo'qotishsiz qabul qilish texnologiyalari ko'rib chiqiladi. Ishning asosiy maqsadi — murakkab muhandislik inshootlari va og'ir sanoat obyektlarida optik tolali sensorlarning uzoq muddatli va ishonchli ishlashini ta'minlovchi muhandislik yechimlarini tizimlashtirishdan iborat.

Аннотация: В данной статье анализируются вопросы повышения стабильности работы волоконно-оптических датчиков (ВОД) в экстремальных условиях — при высоких температурах, сильном механическом давлении, вибрациях и в химически агрессивных средах. Хрупкость силикатного стекла, являющегося основной частью оптических волокон, обуславливает их склонность к обрывам и микроизгибам на практике. В статье рассматриваются современные защитные покрытия, архитектуры капсулирования волокон, а также технологии приема сигналов без потерь, направленные на предотвращение механических повреждений. Основная цель работы — систематизация инженерных решений, обеспечивающих долгосрочную и

надежную работу волоконно-оптических датчиков на сложных инженерных сооружениях и объектах тяжелой промышленности.

Abstract: This article analyzes the issues of increasing the operational stability of fiber optic sensors (FOS) under extreme conditions — high temperatures, strong mechanical pressure, vibrations, and chemically aggressive environments. The brittleness of silicate glass, which is the main component of optical fibers, causes their susceptibility to breakage and microbending in practice. The article examines modern protective coatings, fiber packaging architectures, and lossless signal reception technologies aimed at preventing mechanical damage. The main objective of the work is to systematize engineering solutions that ensure the long-term and reliable operation of fiber optic sensors in complex engineering structures and heavy industrial facilities.

KIRISH

Optik tolali texnologiyalar so‘nggi o‘n yilliklarda jadal rivojlanib, an‘anaviy elektr va pyezoelektrik sensorlarga nisbatan o‘zining qator fundamental afzalliklarini namoyish etdi. Ularning elektromagnit xalaqitlariga ta‘sirchan emasligi, kichik o‘lchamlari, uzoq masofalarga signal uzata olishi hamda bitta tola bo‘ylab bir vaqtning o‘zida ko‘plab nuqtalardan ma‘lumot olish (multiplekslash) qobiliyati ularni noyob o‘lchov vositasiga aylantirdi. Hozirgi kunda bu texnologiyalar aerokosmik soha, neft va gaz sanoati, shuningdek, ko‘priklar, to‘g‘onlar kabi yirik muhandislik obyektlarining strukturaviy yaxlitligini uzluksiz monitoring qilishda (Structural Health Monitoring - SHM) keng qo‘llanilmoqda.

Biroq, obyektlarni monitoring qilish jarayonida optik tolali sensorlar ko‘pincha ekstremal fizik va kimyoviy omillar ta‘siriga uchraydi. Optik tolaning asosi bo‘lgan kremniy oksidi (silica) o‘z tabiati jihatidan mo‘rt material bo‘lib, o‘tkir burchakli egilishlar, kuchli tebranishlar va tashqi mexanik bosimlar natijasida tola sirtida mikro-yorilishlar paydo bo‘lishiga olib keladi. Vaqt o‘tishi bilan material charchog‘i (material fatigue) va atrof-muhitdagi namlik ta‘sirida bu mikro-yorilishlar kengayib, datchikning yakuniy uzilishiga yoki optik signalning kritik darajada so‘nishiga (attenuation) sabab bo‘ladi.

Ekstremal sharoitlarda, masalan, yuqori bosimli quvurlarda yoki qattiq iqlim sharoitidagi ko'priklarda sensorlarning barqaror ishlashini ta'minlash uchun ularning mexanik chidamliligini oshirish talab etiladi. Bunga erishish uchun sensorlarni maxsus ko'p qatlamli materiallar bilan qoplash, o'rnatishdan oldin to'g'ri qadoqlash (packaging) texnologiyalarini qo'llash va kabelning kuchlanish xususiyatlarini muvozanatlash zarur. Ushbu maqola beshta asosiy qismdan iborat bo'lib, ularda mexanik shikastlanish mexanizmlari, qoplama texnologiyalari, qadoqlash usullari, signal barqarorligini ta'minlash va amaliy joriy etish masalalari bosqichma-bosqich, tegishli matematik modellar yordamida tahlil qilinadi..

Optik tolalarning mexanik xususiyatlari va shikastlanish nazariyasiOptik tolali sensorlarning (OTS) ekstremal sharoitlarda ishlash imkoniyatlarini tahlil qilish, birinchi navbatda, ularning asosiy o'tkazgich qatlami bo'lgan silikat shishasining fizik va mexanik xususiyatlarini o'rganishni talab etadi. Silikat shishasi yuqori elastiklik moduliga (Young moduli taxminan 70-73 GPa) ega bo'lishiga qaramay, u o'ta mo'rt material hisoblanadi. Optik tolalarning fundamental uzilish mexanizmi ko'pincha ideal kristall panjarasining parchalanishi emas, balki tola sirtida ishlab chiqarish jarayonida yoki o'rnatish vaqtida paydo bo'ladigan mikro-yorilishlar (microcracks) tufayli yuz beradi. Ushbu yoriqlar tashqi kuchlar ta'sirida datchikning ishonchliligiga bevosita tahdid soladi.

Mo'rt materiallarning yemirilish mexanizmi A.A. Griffith tomonidan ishlab chiqilgan chiziqli elastik sinish mexanikasi nazariyasiga asoslanadi. Ushbu nazariyaga ko'ra, material sirtidagi mikroskopik nuqsonlar va yoriqlar tashqi mexanik kuchlanishni o'z atrofida konsentratsiya qiladi. Qachonki yoriq uchidagi kuchlanish materialning molekulyar bog'lanish energiyasidan oshib ketsa, yoriq tezlik bilan kengayishni boshlaydi va tolaning uzilishiga olib keladi. Buni hisoblash uchun quyidagi matematik formuladan foydalaniladi:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E_\gamma}{\pi a}}$$

Bu yerda σ_f — tolani yemirilishga (uzilishga) olib keluvchi kritik kuchlanish (fracture stress), E — materialning Young moduli, γ — muhitdagi sirt energiyasi, va a — sirtqi yoriqning chuqurligi yoki o'lchami.

Ushbu tenglamadan ko'rinib turibdiki, sirtqi yoriqlar qanchalik chuqur bo'lsa (a ko'rsatkichi katta bo'lsa), tolaning uzilishiga olib keluvchi kritik kuchlanish miqdori (σ_f) shunchalik kichik bo'ladi. Ekstremal sharoitlarda, masalan, neft quduqlarida yoki kuchli yer qimirlashi hududlarida datchiklarga doimiy statik va dinamik kuchlanish ta'sir qiladi. Agar atrof-muhitda namlik darajasi yuqori bo'lsa, holat yanada yomonlashadi. Suv molekulalari silikat shishasining sirtqi yoriqlariga kirib, Si-O-Si bog'larini kimyoviy jihatdan uzadi. Bu jarayon fanda "statik charchoq" deb ataladi va u tashqi mexanik kuchlanish ta'sirida yoriqning kritik o'lchamga yetishini keskin tezlashtiradi.

Optik tolalarning ishonchliligini baholashda yoriqlar o'lchamining tasodifiy taqsimlanishini ham hisobga olish kerak. Garchi Griffith formulasi individual yoriqning harakatini tushuntirsa-da, real muhandislik masalalarida yuzlab metr uzunlikdagi tolalarning ishonchliligi Veybull (Weibull) taqsimoti orqali baholanadi. Bu orqali datchikning uzoq muddatli ekspluatatsiya jarayonida uzilish ehtimolligi bashorat qilinadi.

Shu sababli, sensorlarni mexanik shikastlanishlardan himoya qilish uchun yoriqlar rivojlanishining va statik charchoqning oldini oluvchi texnologiyalarni qo'llash zarur. Yalang'och (qoplamasiz) optik tola ekstremal sharoitga mutlaqo dosh bera olmaydi, chunki havodagi oddiy namlik ham uning mexanik mustahkamligini pasaytirib yuboradi. Bunga qarshi kurashish uchun sensorlarni mexanik ta'sirlarni yutuvchi (amortizatsiya qiluvchi) va kimyoviy moddalarni o'tkazmaydigan maxsus polimer, uglerod yoki metall qatlamlar bilan himoyalash ilmiy jihatdan asosiy yechim hisoblanadi. Aynan shunday himoya yondashuvlari sensorlarning xizmat muddatini o'nlab yillarga uzaytirishi mumkin.

Optik tolalarni mexanik shikastlanishdan himoya qiluvchi qoplama texnologiyalari.

Yalang‘och optik tolalar tashqi ta’sirlarga o‘ta ta’sirchan bo‘lganligi sababli, ularni ishlab chiqarish jarayonining o‘zidayoq maxsus himoya qoplamalari bilan o‘rash talab etiladi. An’anaviy telekommunikatsiya tolalari odatda ikki qavatli akrilat polimerlari bilan qoplanadi. Bunda ichki yumshoq qatlam tashqi tebranishlar va mikrobukilishlarni (microbending) yutuvchi amortizator vazifasini bajarsa, tashqi qattiq qatlam tolaning mexanik ishqalanishlarga chidamliligini ta’minlaydi. Biroq, neft-gaz quduqlari, yadro reaktorlari yoki kuchli kimyoviy muhitlar kabi ekstremal sharoitlarda ishlash uchun standart akrilat qoplamalar yetarli bo‘lmaydi, chunki ular yuqori haroratda (odatda 85°C dan yuqorida) o‘zining fizik xususiyatlarini yo‘qotadi va degradatsiyaga uchraydi.

Ekstremal sharoitlarda optik tolali sensorlarning barqaror ishlashini ta’minlash uchun maxsus muhandislik materiallaridan foydalaniladi. Bularga poliimid, uglerod va turli metall (oltin, mis, alyuminiy) qoplamalari kiradi. Masalan, uglerod qoplamasi qalinligi atigi bir necha yuz nanometr bo‘lishiga qaramay, tola sirtini germetik yopadi va vodorod yoki suv molekulalarining kremniy oksidi yoriqlariga kirib borishiga to‘sqinlik qiladi. Bu esa o‘z navbatida oldingi qismda ta’kidlangan statik charchoq jarayonini to‘xtatadi. Metall qoplamalar esa sensorlarning 600°C gacha bo‘lgan yuqori haroratlarda barqaror ishlashiga hamda korroziyaga qarshi turishiga imkon beradi.

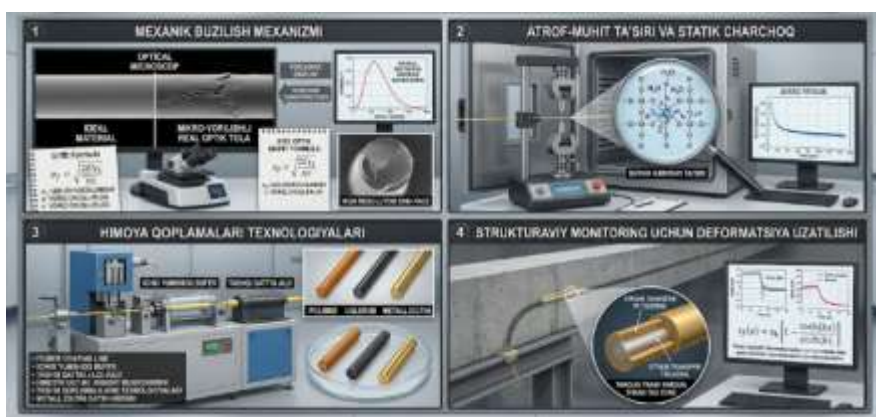
Shuni inobatga olish kerakki, obyektlarning strukturaviy monitoringi (SHM) jarayonida himoya qoplamasi datchikni faqatgina shikastlanishdan saqlab qolmay, balki tekshirilayotgan obyektning mexanik deformatsiyasini (kuchlanishini) tolaga aniq uzatib berishi ham zarur. Agar qoplama haddan tashqari yumshoq yoki qalin bo‘lsa, u mexanik kuchlanishni o‘zlashtirib oladi va sensor noto‘g‘ri (past) ko‘rsatkichlarni qayd etadi. Siljish siljishi nazariyasiga asoslanib, obyekt qatlamidan himoya qoplamasi orqali optik tolaga deformatsiyaning uzatilishini quyidagi matematik formula orqali hisoblash mumkin:

$$\varepsilon_f(x) = \varepsilon_m \left[1 - \frac{\cosh(kx)}{\cosh(kL)} \right]$$

Bu yerda $\varepsilon_f(x)$ — optik tola yadrosiga yetib boradigan deformatsiya (strain), ε_m — kuzatilayotgan obyekt (matritsa) sirtidagi haqiqiy mexanik deformatsiya, L — tolani

yopishtirilgan yoki mahkamlangan qismining yarim uzunligi, hamda k — himoya qoplamasining elastiklik siljish moduli (shear modulus) va qalinligiga bog‘liq bo‘lgan qat‘iylik koeffitsiyenti.

Ushbu tenglama himoya qoplamalarini loyihalashdagi asosiy muhandislik kompromissini ko‘rsatib beradi. Datchik yorilib ketmasligi va mexanik zarbalardan himoyalaniishi uchun qalinroq va elastikroq qoplama (kichik k qiymati) talab etiladi. Biroq bu holatda deformatsiyaning optik tolaga to‘liq uzatilishi pasayadi, oqibatda o‘lchov aniqligi yo‘qotiladi. Shu sababli, ekstremal sharoitlarda ishlaydigan optik tolali sensorlarning himoya qobig‘ini yaratishda formula asosida materialning Young moduli va uning qalinligi matematik jihatdan qat‘iy muvozanatlashtirilishi shart bo‘ladi. Bunday yondashuv sensor uzilishlarining oldini olish bilan birga metrologik aniqlikni ham kafolatlaydi.



1-rasm. Optik tolalarning mexanik shikastlanish nazariyasi va himoya qoplamalari texnologiyasi

Ekstremal muhitlar uchun optik datchiklarni qadoqlash (packaging) va strukturaviy integratsiya texnologiyalari.

Optik tolalarni himoya qoplamalari (polimer, karbon yoki metall) bilan o‘rash ularning dastlabki egiluvchanligi va mikro-yorilishlarga qarshi mustahkamligini ta‘minlasa-da, og‘ir sanoat obyektlari (masalan, neft-gaz quvurlari, ko‘priklar, to‘g‘onlar va geologik hududlar) sharoitida to‘g‘ridan-to‘g‘ri ekspluatatsiya qilish uchun bu yetarli

emas. Datchiklarni tashqi obyektlarning qattiq jismiga (beton, metall konstruksiyalar) oʻrnatish jarayonida yuzaga keladigan keskin mexanik zarbalardan, qurilish texnikasi taʼsiridan va atrof-muhitning yuqori gidrostatik bosimidan himoya qilish maqsadida ixtisoslashtirilgan muhandislik qadoqlash (packaging) arxitekturalari qoʻllaniladi.

Qadoqlash arxitekturasini qoʻllanilish sohasiga qarab asosan ikki turga boʻlinadi: polimer kompozitlar (FRP - Fiber Reinforced Polymers) va zanglamas poʻlatdan yasalgan kapillyar naychalar. FRP qadoqlash texnologiyasida optik tola shisha, aramid yoki uglerod tolalari bilan birgalikda epoksi qatroniga botirilib, mustahkam armatura shakliga keltiriladi. Ushbu usul, ayniqsa, temir-beton konstruksiyalarning ichiga datchiklarni toʻgʻridan-toʻgʻri joylashtirish (embedding) uchun eng maqbul yechim hisoblanadi. Sababi, FRP materiallari metallarga oʻxshab korroziyaga uchramaydi va sementning oʻta agressiv kimyoviy ishqoriy muhitiga (pH darajasi 12-13 atrofida) uzoq yillar davomida mukammal bardosh bera oladi.

Biroq, qadoqlash jarayonida datchikning asosiy funksiyasi — oʻlchanayotgan obyektning fizik oʻzgarishlarini datchikka yoʻqotishsiz yetkazib berish ekanligi hisobga olinishi qatʼiy talab etiladi. Qadoqlash materiali qanchalik qalin yoki elastiklik darajasi past boʻlsa, datchikning sezgirlik shunchalik pasayadi va oʻlchov xatoliklari kelib chiqadi. Obyektning (host material) deformatsiyasi qadoqlash qatlami orqali yadroga qanday nisbatda oʻtishini baholash uchun deformatsiyani uzatish koeffitsiyenti (α) tahlil qilinadi. Oddiylashtirilgan koʻp qatlamli silindrik qadoqlash modeli uchun deformatsiya uzatish samaradorligi quyidagi matematik formula orqali hisoblanadi:

$$\alpha = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_h} = \frac{1}{1 + \frac{E_f r_f^2}{E_p (r_p^2 - r_f^2)}}$$

Bu yerda:

α — deformatsiyani uzatish samaradorligi koeffitsiyenti ($0 \leq \alpha \leq 1$),

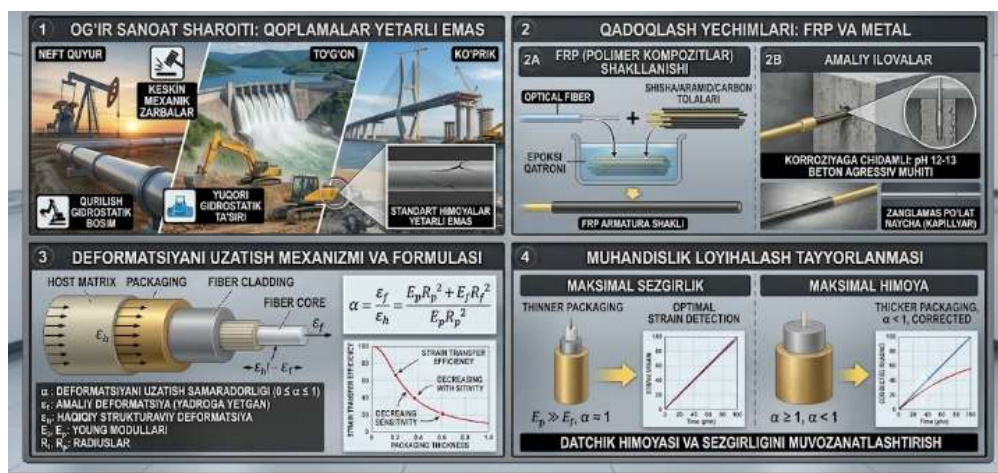
ε_f — optik tola yadrosiga yetib boruvchi amaliy deformatsiya,

ε_h — tashqi obyektning (matritsaning) haqiqiy strukturaviy deformatsiyasi,

E_f va E_p — mos ravishda optik tola va qadoqlash (packaging) materialining Young modullari,

r_f va r_p — optik tola va qadoqlash qatlamining radiuslari.

Ushbu tenglama sensorli tizimlarni loyihalashda kritik ahamiyatga ega bo‘lib, u shuni ko‘rsatadiki, datchik tashqi mexanik shikastlanishlardan yuqori darajada himoyalaniishi bilan birga maksimal sezgirlikka erishishi uchun ($\alpha \approx 1$), qadoqlash materialining Young moduli (E_p) tolanikiga nisbatan yetarli darajada katta bo‘lishi yoki qadoqlash qatlamining xossalriga qarab tegishli tuzatish koeffitsiyentlari kiritilishi lozim.



2-rasm. Og‘ir sanoat sharoitida optik tolali datchiklar uchun ixtisoslashtirilgan qadoqlash arxitekturalari

Yuqori harorat va bosimli (HPHT - High Pressure High Temperature) muhitlarda, masalan, yer osti quduqlari yoki geofizik tadqiqotlarda FRP o‘rniga monolitik zanglamas po‘latdan yasalgan kapillyar qadoqlash keng qo‘llaniladi. Bunday arxitektura optik tola mikroskopik metall naycha ichiga tortiladi va bo‘shliq gidrofobik gel bilan to‘ldiriladi yoxud lazerli payvandlash orqali butunlay germetik yopiladi. Bu texnologiya makrobukilishlardan (macrobending) himoya qilibgina qolmay, balki atrof-muhitdagi vodorod molekulalarining tolaga singib kirishi oqibatida signal yo‘qolishiga olib keluvchi optik xiralashuv (hydrogen darkening) fenomenining ham to‘liq oldini oladi.

Ekstremal tebranishlar va mexanik zo‘riqishlar ta’sirida optik signallarning so‘nishini (attenuation) kompensatsiya qilish texnologiyalari

Himoya qoplamalari va mustahkam qadoqlash arxitekturalari optik tolani to‘g‘ridan-to‘g‘ri jismoniy uzilishlardan asrasa-da, og‘ir sanoat obyektlari va murakkab muhandislik inshootlarida (masalan, muttasil transport oqimi mavjud ko‘priklar yoki kuchli tebranish ostida ishlaydigan nasos stansiyalari) datchiklarga doimiy dinamik kuchlanishlar ta’sir etadi. Ushbu uzluksiz vibratsiyalar va tashqi bosimlar qadoqlash ichidagi optik tolaning o‘qi bo‘ylab ko‘rinmas mikrobukilishlarni (microbending) va makrobukilishlarni (macrobending) hosil qiladi. Bukilishlar yorug‘lik nurining tola yadrosidan (core) qobig‘iga (cladding) o‘tib ketishiga va oxir-oqibat o‘lchov signalining so‘nishiga (attenuation) olib keladi.

Signallarni yo‘qotishsiz qabul qilish texnologiyalarini ishlab chiqishda, avvalo, bukilish radiusi va tolaning optik xususiyatlari o‘rtasidagi munosabatni chuqur modellashtirish talab etiladi. Ayniqsa, strategik obyektlarda optik signalning kritik pasayishi tizim tomonidan “soxta avariya” (false alarm) sifatida qabul qilinishi yoki haqiqiy xavfning e’tibordan chetda qolishiga sabab bo‘lishi mumkin. Makrobukilishlar oqibatida yuzaga keladigan optik quvvatning yo‘qolish koeffitsiyenti (α_b) eksponensial xarakterga ega bo‘lib, uning asimptotik funksiyasi quyidagi matematik formula orqali ifodalanadi:

$$\alpha_b = A * \exp (-B * R)$$

Bu yerda:

α_b — bukilish natijasida optik signalning yo‘qolish koeffitsiyenti ($\frac{dB}{km}$ yoki dB/m hisobida);

R — tolaning fizik bukilish radiusi (qadoqlash jarayonida yoki deformatsiya paytida hosil bo‘ladigan egrilik);

A va B — optik tolaning turiga (bir modali yoki ko‘p modali), uning raqamli aperturasiga (Numerical Aperture - NA) va o‘tkazilayotgan yorug‘likning to‘lqin uzunligiga (γ) bog‘liq bo‘lgan empirik o‘zgarmas kattaliklar.

Ushbu tenglamadan xulosa qilish mumkinki, ekstremal mexanik bosim ostida egrilik radiusi (R) qanchalik kichiklashsa, signal yo‘qolishi shunchalik tezlashadi. Buning oldini olish uchun zamonaviy muhandislik yechimlarida bukilishga sezgir bo‘lmagan (Bend-Insensitive Optical Fibers - BIOF) maxsus tolalardan foydalaniladi. Ularning qobig‘i (cladding) ichida sinish ko‘rsatkichi pasaytirilgan qo‘shimcha xandaq qatlami (trench layer) shakllantiriladi. Ushbu arxitektura yorug‘lik nurini yadro markaziga kuchliroq “qamab qo‘yadi” va B koeffitsiyentining qiymatini sun’iy ravishda oshirish orqali ekstremal tebranishlar vaqtida ham signalning to‘liq hajmda yetib borishini ta’minlaydi. Datchiklarni aynan shunday xususiyatga ega tolalardan loyihalash signal barqarorligini bir necha barobarga oshiradi.

Optik tolali tizimlarning uzoq muddatli ishonchliligini baholash va xizmat muddatini bashorat qilish modellari.

Mexanik shikastlanishlarning oldini olish va ekstremal sharoitlarda ishlash barqarorligini oshirish bo‘yicha ko‘rilgan barcha muhandislik choralari (himoya qoplamalari, kompozit qadoqlashlar, yo‘qotishsiz signal o‘tkazish) amaliyotda uzluksiz ishlash muddatini uzaytirishga xizmat qiladi. Biroq, materiallarning fizik charchog‘i (fatigue) va uzoq yillik ekspluatatsiya sababli datchiklarning degradatsiyasi baribir sodir bo‘ladi. Shu sababli, murakkab muhandislik inshootlarida (masalan, 50-100 yilga mo‘ljallangan strategik ko‘priklar yoki to‘g‘onlarda) optik tolali sensorlarning haqiqiy ishonchliligini hisoblash tizim loyihasining ajralmas qismidir.

Vaqt o‘tishi bilan optik tolaga ta’sir qiluvchi statik kuchlanish korroziyasi oldingi qismlarda aytib o‘tilgan mikroskopik yoriqlarning sekin-asta o‘sishiga sabab bo‘ladi. Datchik materialining aynan qachon o‘zining kritik yemirilish nuqtasiga yetishini, ya’ni uning xizmat qilish muddatini (Time to failure - t_f) bashorat qilish uchun standartlashtirilgan charchoq modellaridan keng foydalaniladi. Ushbu matematik

bog‘liqlik chiziqli elastik mexanika va Veybull ehtimollik taqsimotining integratsiyasi asosida quyidagicha ifodalanadi:

$$t_f = \frac{B * S_i^{n-2}}{\sigma_a^n}$$

Bu yerda:

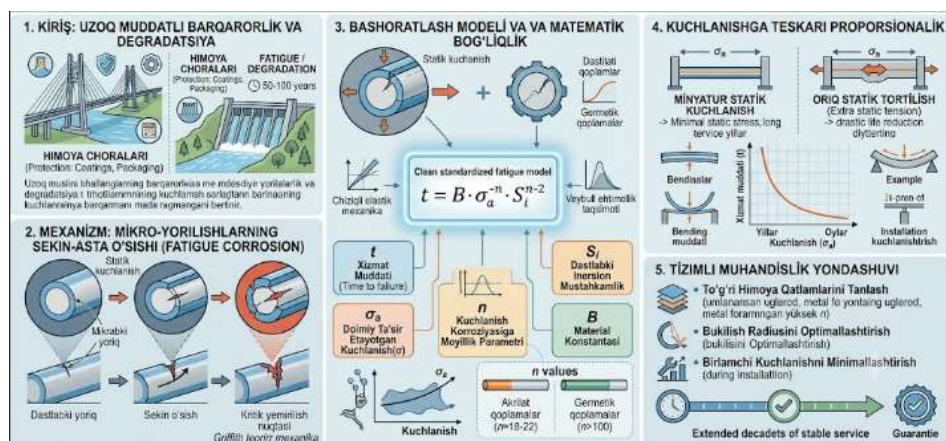
t_f — optik tolaning to‘liq uzilishiga (ishdan chiqishiga) qadar bo‘lgan vaqt;

σ_a — ekspluatatsiya davomida tolaga doimiy ta’sir etayotgan amaliy mexanik kuchlanish;

n — kuchlanish korroziyasiga moyillik parametri (stress corrosion susceptibility parameter, standart akrilat qoplamali kvarts tolalari uchun odatda $n \approx 20$, germetik qoplamalar uchun esa $n \geq 100$);

S_i — tolaning ishlab chiqarilgan vaqtdagi dastlabki inersion mustahkamligi;

B — atrof-muhit harorati, namlik darajasi va shishaning kimyoviy tarkibiga bog‘liq bo‘lgan material konstantasi.



3-rasm. Uzoq muddatli ekspluatatsiyada optik tolalarning ishonchliligi: Matematik modellashtirish

Yuqoridagi bashoratlash modeli asosida ko‘rish mumkinki, sensorning xizmat qilish muddati (t_f) unga ta’sir etayotgan doimiy kuchlanishning (σ_a) n -darajasiga teskari

proporsionaldir. Bu shuni anglatadiki, qadoqlash yoki obyektga integratsiya qilish jarayonida datchikda shakllanib qoladigan eng kichik ortiqcha statik tortilish ham uning ishlash muddatini yillardan oylarga tushirib yuborishi mumkin. Amaliyotda, n parametrining qiymatini maksimal darajada yuqori ushlab turish uchun oldingi boblarda tahlil qilingan uglerod (carbon) va metall germetik qoplamalardan foydalaniladi. Tizimli muhandislik yondashuvi — himoya qatlamlarini to‘g‘ri tanlash, tolaning bukilish radiusi parametrlarini optimallashtirish va o‘rnatish jarayonidagi birlamchi kuchlanishni minimallashtirish — optik tolali sensorlarning ekstremal sharoitlarda belgilangan muddat davomida barqaror va xatosiz ishlashini to‘liq kafolatlaydi.

XULOSA

Mazkur maqolada optik tolali sensorlarning (OTS) ekstremal sharoitlarda ishlash barqarorligini oshirish va mexanik uzilishlarning oldini olishga qaratilgan kompleks muhandislik yechimlari tahlil qilindi. Silikat shishasining mo‘rtligi va statik charchoq muammolarini hal etish uchun datchiklarni maxsus himoya qoplamalari (polimer, uglerod, metall) hamda mustahkam qadoqlash arxitekturalari (FRP kompozitlari, zanglamas po‘lat kapillyarlar) orqali himoyalash mexanizmlari asoslab berildi. Tebranishlar oqibatida optik signalning so‘nishini kompensatsiya qilish va tizimning ishlash muddatini matematik modellashtirish orqali OTS ishonchliligi ta‘minlanishi ko‘rsatildi. Ushbu ilg‘or qoplama va qadoqlash texnologiyalarini amaliyotga joriy etish yirik sanoat va muhandislik inshootlarida uzluksiz strukturaviy monitoring (SHM) tizimlarining uzoq muddatli, xavfsiz va aniq ishlashini to‘liq kafolatlaydi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati

1. Bao, X., & Chen, L. (2012). Recent progress in distributed fiber optic sensors. *Sensors*, 12(7), 8601-8639.
2. Barrias, A., Casas, J. R., & Villalba, S. (2016). A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications. *Sensors*, 16(5), 748.

3. Glaesemann, G. S. (2017). Mechanical reliability of optical fibers. In *Specialty Optical Fibers Handbook* (pp. 653-673). Academic Press.
4. Krohn, D. A., MacDougall, T. W., & Mendez, A. (2014). *Fiber Optic Sensors: Fundamentals and Applications* (4th ed.). SPIE Press.
5. Li, D. S., Li, H. N., Ren, L., & Sun, M. (2006). Strain transferring analysis of fiber Bragg grating sensors. *Optical Engineering*, 45(2), 024402.
6. Majumder, M., Gangopadhyay, T. K., Chakraborty, A. K., Dasgupta, K., & Bhattacharya, D. K. (2008). Fibre Bragg gratings in structural health monitoring—Present status and applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 147(1), 150-164.
7. Mihailov, S. J. (2012). Fiber Bragg grating sensors for harsh environments. *Sensors*, 12(2), 1898-1918.
8. Udd, E., & Spillman, W. B. (2011). *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
9. Wang, H., Xiang, P., & Jiang, L. (2016). Strain transfer theory of industrialized optical fiber sensors. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6(4), 523-533.
10. Ye, X. W., Su, Y. H., & Han, J. P. (2014). Structural health monitoring of civil infrastructure using optical fiber sensing technology: A comprehensive review. *The Scientific World Journal*, 2014, 652329.