DOI: 10.65322/j.srd.06202026.25

TOG‘-KON USKUNALARI ISHCHI QISMLARINING KRITIK ZONALARINI CHEKLI ELEMENTLAR USULIDA ANIQLASH

Pirnazarov Sh.X., Pardayev R.K., Mirqodirov Sh.T.,
E-mail: pirnazarovshohruh@gmail.com
Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti

Annotatsiya. *Navoiy mashinasozlik zavodida tayyorlanadigan jag‘li maydalagich futerovkasi, 10ГР8Л pulpa nasosi ishchi g‘ildiragi va konveyer barabanining rezina-metall segmenti bo‘yicha sonli natijalar umumlashtirildi. Maqsad kritik zonani aniqlashda geometriya, material modeli va chegaraviy shartlarning ta’sirini ajratishdir. Futerovkaning Python CST modeli hamda nasos va segmentning ANSYS Mechanical 2024 R2 hisoblari tahlil qilindi. Nasosda eng katta bosh cho‘zuvchi kuchlanish 8,9758 MPa, segment metallida von Mises maksimumi 3,1286 MPa bo‘ldi. Tish profilini o‘zgartirishda ko‘chish 2,750 marta, asosning o‘rtacha kuchlanishi esa 1,086 marta ortgan. To‘rga sezgirlik, reaksiya muvozanati va rezinaning katta deformatsiyalari alohida baholandi. Natijalar materialga mos mezon tanlash va statik hisob chegarasini saqlash zarurligini ko‘rsatdi.*

Аннотация. *Обобщены численные результаты по футеровке щековой дробилки, рабочему колесу шламового насоса 10ГР8Л и резинометаллическому сегменту барабана конвейера, изготавливаемым на Навоийском машиностроительном заводе. Цель – разделить влияние геометрии, модели материала и граничных условий на определение критической зоны. Проанализированы модель футеровки Python CST, а также расчёты насоса и сегмента в ANSYS Mechanical 2024 R2. Наибольшее главное растягивающее напряжение в насосе составило 8,9758 МПа, максимум напряжения по Мизесу в металле сегмента – 3,1286 МПа. При изменении профиля зуба перемещение увеличилось в 2,750 раза, а среднее напряжение в основании – в 1,086 раза. Отдельно оценены сеточная сходимость, равновесие реакций и большие деформации резины. Результаты показывают необходимость выбора критерия, соответствующего материалу, и соблюдения границ применимости статического расчёта.*

Abstract. *Numerical results are summarised for a jaw crusher liner, the impeller of a 10GR8L slurry pump and a rubber–metal segment of a conveyor drum manufactured at the Navoi Machine-Building Plant. The aim is to separate the effects of geometry, material model and boundary conditions on the identification of the critical zone. A Python CST model of the liner and ANSYS Mechanical 2024 R2 analyses of the pump and the segment were examined. The maximum principal tensile stress in the pump was 8.9758 MPa, and the maximum von Mises stress in the segment metal was 3.1286 MPa. Changing the tooth profile increased the displacement by a factor of 2.750 and the mean stress at the base by a factor of 1.086. Mesh sensitivity, reaction equilibrium and large rubber strains were assessed separately. The results show the need to select a material-appropriate criterion and to respect the limits of static analysis.*

Kalit so‘zlar: *ANSYS Mechanical, chekli elementlar usuli, kritik zona, kontakt, futerovka, pulpa nasosi, rezina-metall segment, to‘rga sezgirlik.*

Ключевые слова: *ANSYS Mechanical, метод конечных элементов, критическая зона, контакт, футеровка, шламовый насос, резинометаллический сегмент, сеточная сходимость.*

Keywords: *ANSYS Mechanical, finite element method, critical zone, contact, liner, slurry pump, rubber–metal segment, mesh sensitivity.*

Kirish. Tog‘-kon uskunasida ishchi qismning umumiy hajmi yoki o‘rtacha yuklanishi uning mahalliy shikastlanish xavfini to‘liq ifodalamaydi. Tish cho‘qqisi, halqasimon o‘tish, bolt

DOI: 10.65322/j.srd.06202026.25

teshigi va protektor o‘yig‘ida geometrik uzluksizlik hamda tayanch sharti kuchlanish gradientini o‘zgartiradi. Shuning uchun takomillashtirishdan oldin aynan qaysi zona ishlash qobiliyatini cheklayotganini va uning qaysi fizik kattalik orqali nazorat qilinishini aniqlash zarur [1–3].

Lindqvist va Evertsson jag‘li maydalagich futerovkasida yeyilishning mahalliy sirpanish hamda ishchi profil o‘zgarishi bilan bog‘liqligini ko‘rsatgan [4]. Walker va Robbie laboratoriya sinovi sharoiti nasosdagi haqiqiy yeyilish mexanizmiga mos kelmasa, materiallar bo‘yicha natija tartibi ham o‘zgarishi mumkinligini aniqlagan [5]. Persson konveyer yuritmasida moment, sirpanish va elastik moslashuvni birgalikda qaragan [6]. Bu ishlar yuklanish sxemasini materialdan ajratib baholash yetarli emasligini asoslaydi.

Mazkur tadqiqotda uchta mustaqil obyekt bir xil kuchlanish chegarasi bo‘yicha reyting qilinmaydi. Qiyosning predmeti — hisobning kirish shartlari, kuzatiladigan javob va nazorat zonasini tanlash tartibidir. Futerovkada cho‘qqi va asos javobi, mo‘rt g‘ildirakda bosh cho‘zuvchi kuchlanish, segmentda esa po‘lat va rezinaning alohida deformatsiyalanishi ko‘rib chiqiladi.

Ishning ilmiy hissasi mavjud hisob maydonlarini qayta talqin qilish, sonli jadvallardan o‘lchovsiz ko‘rsatkichlar hosil qilish va yechimning tekshirilgan jihatlarini uning cheklovlaridan ajratishdan iborat. Natijalar NMZda tayyorlangan qismlar uchun konstruktiv nazorat va keyingi tajriba nuqtalarini tanlashga xizmat qiladi.

Uch obyektning ishlash sharoiti turlicha: tish geometriyasi yukni cho‘qqidan asosga uzatadi, nasos g‘ildiragi aylanish va moment ta’sirida ishlaydi, segmentda esa bosim yumshoq qoplama orqali metallga o‘tadi. Shu farqlar hisobni birlashtirishda saqlanadi. Tadqiqot savoli quyidagicha qo‘yildi: bir xil sonli tahlil tamoyillari yordamida har bir obyekt uchun tekshiriladigan kritik zona va unga mos javobni qanday tanlash mumkin? Buning uchun avval yuk va tayanchlar tavsifi tiklandi, keyin materialga mos kuchlanish yoki siljish olindi, so‘ng natija barqarorligi baholandi. Bunday ketma-ketlik kesimni kuchaytirish, o‘tish radiusini o‘zgartirish yoki qoplama parametrini tanlash kabi keyingi konstruktiv ishlar uchun asos beradi. Ushbu o‘zgartirishlarning amaliy samarasi esa alohida hisob va tajriba bilan baholanadi.

Tadqiqot metodologiyasi. ***Obyektlar va material modellarini tanlash.*** Tahlil [1–3] manbalarda berilgan tayyor hisob natijalariga asoslandi. Futerovka tishining T0, U0 va U1 kesimlari geometriya omilini ajratadigan shartli ikki o‘lchamli modellar; nasos esa standart yaxlit oq cho‘yan g‘ildirakning uch o‘lchamli modeli. Konveyer segmentida Ст3 metall asos va SBR Analog 63Sha rezina alohida hajmiy jismlar sifatida qaralgan. Rasmlar va jadvallar bir xil hisob holatiga mansubligi bo‘yicha moslashtirildi.

1-jadval

Hisoblarda qabul qilingan material kartalari [1–3]

Hisob sohasi	E, MPa	ν	ρ, kg/m³	Model mazmuni
Futerovka CST	200 000	0,30	—	Bir xil elastik xossalar
Nasos oq cho‘yani	180 000	0,28	7 500	Izotrop chiziqli
Segment po‘lati	200 000	0,30	7 850	Izotrop; σy = 250 MPa
Segment rezinasi	4,1	0,49	1 150	Chiziqli elastik yaqinlashuv

Jadval material kartalaridagi hisobiy parametrlarni beradi. Ular barcha ishlab chiqarilgan quymalarning sinov bilan aniqlangan mustahkamlik chegarasi sifatida olinmaydi. Ayniqsa oq cho‘yanning mo‘rt buzilishi uchun cho‘zilishdagi mustahkamlik, nuqsonlar va darzga chidamlilik alohida tekshiriladi. Rezina qattiqligining Shore A qiymati esa o‘z-o‘zidan uning to‘liq giperelastik modelini bermaydi.

Muvozanat va mezonlarning matematik ifodasi. Kichik deformatsiyalar farazida hajmiy kuchlar mavjud sohada mahalliy muvozanat, siljishdan deformatsiyaga o‘tish hamda izotrop elastik bog‘lanish quyidagicha yoziladi:

$$\nabla \cdot \sigma + \rho\, b = 0\,; \quad \varepsilon = \tfrac{1}{2}\left(\nabla u + \nabla u^{T}\right) \tag{1}$$

$$\sigma = 2G\,\varepsilon + \lambda\, \mathrm{tr}(\varepsilon)\, I\,; \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)}\,; \quad \lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \tag{2}$$

DOI: 10.65322/j.srd.06202026.25

Bu yerda u — siljishlar vektori; ε va σ — deformatsiya hamda kuchlanish tenzorlari; b — hajmiy tezlanish; ρ — zichlik; G va λ — Lamé parametrlari; I — birlik tenzor. Nasosda b markazdan qochma ta’sirni qamrab oladi. Segmentning keltirilgan statik holatida hajmiy mexanik kuchlar berilmagan. N–mm–s tizimida nasos zichligi $7{,}5\cdot10^{-9}$ t/mm³ ko‘rinishida kiritilgan.

Metallning ekvivalent kuchlanishi bosh kuchlanishlar orqali aniqlanadi. Bu skalyar po‘latdagi murakkab kuchlanganlikni umumlashtiradi; mo‘rt materialda musbat bosh kuchlanishni tekshirish bilan to‘ldiriladi:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}{2}} \quad (3)$$

Hisobiy U ko‘rsatkichi uchta siljish komponentining modulidir. U rezina qatlamining faqat normal siqilishini ham, detalning qoldiq plastik deformatsiyasini ham bevosita bildirmaydi. Elastik holat, siljish kattaligi va yeyilish resursi alohida fizik ma’nolarga ega.

CST uch tugunli uchburchak element bo‘lib, uning ichidagi siljish chiziqli, deformatsiya esa doimiy qabul qilinadi. Tekis kuchlanish holatida σz = τxz = τyz = 0; hajmiy elastik qonun shu shart orqali ikki o‘lchamga keltiriladi. Qalinlik element bikrligi va yuk birligiga kiradi, shuning uchun 1 mm kesim natijasini butun plitaga bevosita ko‘chirish mumkin emas. Hajmiy kvadratik elementlarda siljishning yuqoriroq tartibli approksimatsiyasi egri sirtni tasvirlashni yaxshilaydi. Biroq element tartibi lokal zichlashtirish o‘rnini bosmaydi: keskin o‘tish va kontakt chetida gradientning yetarli ajratilishi tekshirilishi kerak. Natijalarni olishda bir xil birlik tizimi va tanlangan soha saqlanishi qiyosning zarur shartidir.

Yuklar, tayanchlar va kontakt shartlari. Futerovkada 1 mm qalinlikdagi kesimning yuqori qirrasiga $F_x = 20$ N, $F_\gamma = -100$ N teng taqsimlangan; pastki qirra siljishlari nolga teng. Barcha variantlarda E va ν bir xil saqlangan. Shu yo‘l bilan tish profilining ta’siri material o‘zgarishidan ajratilgan. Mazkur yuk haqiqiy maydalash kamerasi bo‘yicha umumiy sanoat kuchi sifatida talqin qilinmaydi [1].

Nasosda aylanish o‘qi Global X bo‘ylab yo‘nalgan. n = 750 min⁻¹ uchun ω = 78,54 rad/s, qabul qilingan 300 kW mexanik quvvat uchun M ≈ 3 820 N·m. Qarshilik momenti kuraklarning 12 yuzasiga taqsimlangan. Vtulkaning tashqi sirtiga 1 MPa shartli normal bosim qo‘yilgan; u o‘lchangan salnik yoki nasos chiqish bosimi emas. Ichki tutashish sirti Deformable turidagi Remote Displacement bilan cheklangan [2].

Segmentda $T_1 = 75$ kN va $T_2 = 35$ kN rejimdan protektorning 281 231,05 mm² ishchi yuzasiga 0,09771485 MPa bosim keltirilgan. Global Z bo‘yicha kuch −6 405,44 N, Y bo‘yicha qoldiq tuzatish momenti +282 228,01 N·mm. To‘qqizta teshikning 12 ta CAD yuzasida Fixed Support mavjud. Ushbu shart boltlarning oldindan tortilishini modellashtirmaydi; metall ichki sirtidagi Compression Only Support faqat siqilishda normal tayanch beradi [3, 7].

$$K\,u = F;\quad R(u) = F_e - F_i - F_c = 0 \quad (4)$$

$$g_n \geq 0;\quad p_n \geq 0;\quad g_n p_n = 0 \quad (5)$$

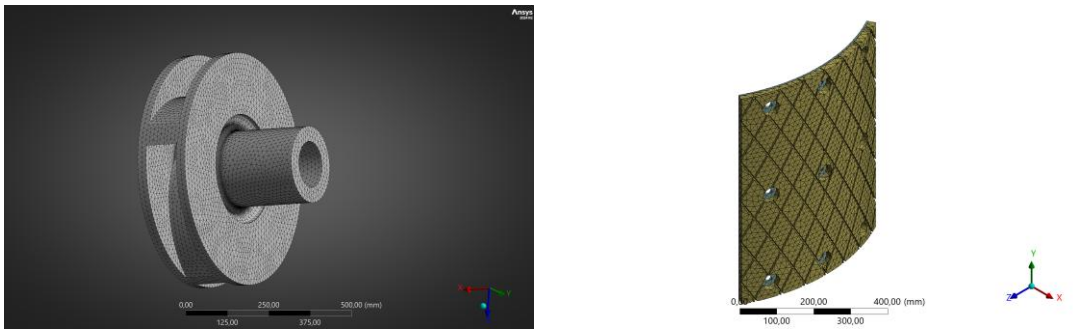
K — bikrlik matritsasi, R — qoldiq kuchlar; e, i va c indekslar tashqi, ichki va kontakt ta’sirlarini bildiradi; g_n — tirqish, p_n — musbat siqilish bosimi. Kontakt sohasi noma’lumligi sababli segment yechimi katta siljish o‘chirilganda ham kontakt bo‘yicha nochiziqlidir. Rezina–metall orasidagi Bonded MPC uzluksiz bog‘lanishni beradi; yelimning ajralishi va zarar to‘planishini ifodalamaydi [7].

2-jadval

Asosiy to‘r va yechim parametrlari [1–3]

Model	Tugunlar	Elementlar	Ajratish va yechim
T0 U0 U1 CST	7 081	13 824	72×96; tekis kuchlanish
Standart nasos	197 597	126 025	Quadratic; 15 mm, lokal 3 mm
Standart segment	40 734	20 579	Quadratic; 20 mm, kontaktli

DOI: 10.65322/j.srd.06202026.25

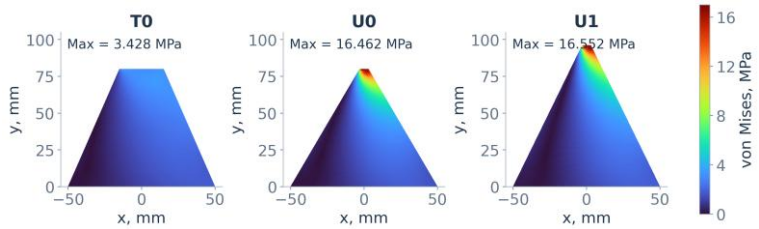


1-rasm. Asl ANSYS to‘rlari: chapda nasos g‘ildiragi [2, 2.10-rasm], o‘ngda standart segment [3, 2.17-rasm]

Qayta tiklash tartibi geometriya va birliklarni tekshirish, material kartalari, Named Selection, yuklar va kontaktlarni tayinlash, to‘r hosil qilish, Solve holati hamda reaksiyalarni tekshirishdan tuziladi. Saqlangan t = 1 s belgisi statik yuklash bosqichining yakunidir; ekspluatatsiya davomiyligi emas.

Postprotsessorda metall va rezina uchun alohida Named Selection orqali maksimumlar olinadi. Har bir natijada birlik, vaqt bosqichi, tanlangan jism va deformatsiya tasvirining masshtabi qayd qilinadi. Bu tartib avtomatik kattalashtirilgan shaklni haqiqiy siljish bilan yoki umumiy model maksimumini alohida qatlam maksimumi bilan adashtirishni oldini oladi.

Natijalar va ularning tahlili. ***Futerovka tishi geometriyasining mahalliy javobga ta’siri.*** T0 trapetsiyasimon, U0 tor cho‘qqili, U1 esa balandligi oshirilgan kesimdir. Bir xil yukda cho‘qqining torayishi kuchni kichikroq qirraga uzatadi va yuqori zonadagi kuchlanish gradientini oshiradi. 2-rasmdagi maydonlar Python CST hisobiga tegishli; ular ANSYSning uch o‘lchamli sanoat modeli bilan aralashtirilmaydi.



2-rasm. T0 U0 U1 kesimlaridagi von Mises maydonlari. Bir xil MPa shkalasidagi asl Python CST natijalari [1, 2.8-rasm]

3-jadval

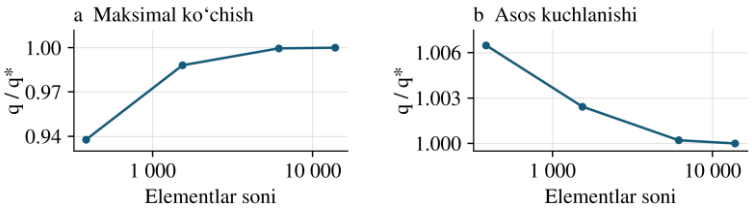
Yakuniy shartli FEM hisobining asosiy javoblari [1]

Ko‘rsatkich	T0	U0	U1
Umax, mm	0,001159	0,002300	0,003186
Asos zonasi σVM, MPa	1,139	1,220	1,237
Butun tish max σVM, MPa	3,428	16,462	16,552
Umax ning T0ga nisbati	1,000	1,985	2,750

Asos sohasi 0,05h–0,20h oralig‘ida olinib, o‘rtacha kuchlanish element yuzalari bilan vaznlangan. Shu sababli uning 1,086 nisbatini butun tish maksimumlarining nisbatiga almashtirish mumkin emas. Tishning egiluvchanligi va mahalliy cho‘qqi kuchlanishi bir xil konstruktiv mezon emas.

$$\delta_q = \frac{|q_{fine} - q_{coarse}|}{|q_{fine}|} \cdot 100\ \% \qquad (6)$$

DOI: 10.65322/j.srd.06202026.25

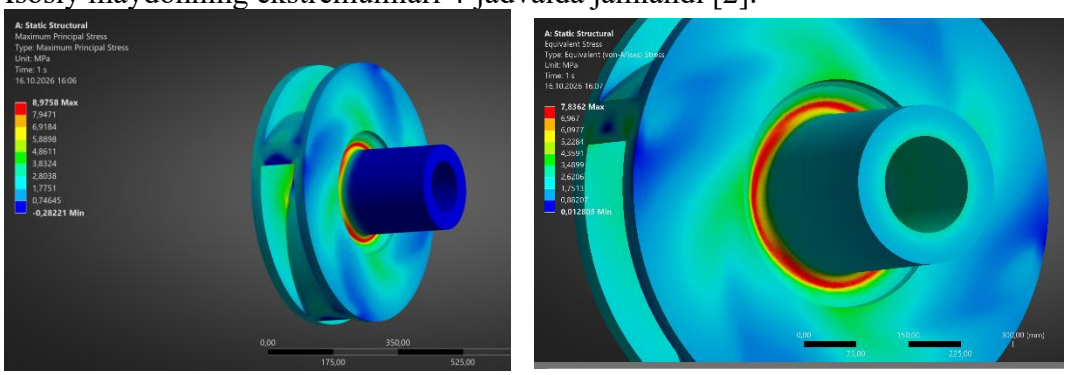


3-rasm. U1 modeli uchun to‘rga sezgirlik. q* — eng zich to‘rdagi qiymat; [1, 2.7-jadval] sonlari shu qiymatga normallashtirildi

Oxirgi 6 144 → 13 824 element o‘tishida jadvaldan qayta hisoblangan Umax farqi T0, U0 va U1 uchun taxminan 0,035; 0,122 va 0,044 %. Asos kuchlanishi farqi 0,042 % dan kichik. Yaxlitlangan jadval sonlaridan olingan bu baholar tanlangan javoblarning barqarorlashuvini bildiradi; barcha fizik va geometrik xatolarning umumiy chegarasi emas.

Cho‘qqidagi maksimumni baholashda yukning nuqtaga yoki qirraga qo‘yilishi ham saqlanishi kerak. Profilning mahalliy radiusi va yuk maydoni o‘zgarsa, to‘rga yaqinlashgan yechimning o‘zi ham boshqa fizik masalaga tegishli bo‘ladi.

Nasos g‘ildiragining kritik o‘tish zonasi. Bosh cho‘zuvchi kuchlanishning maksimumi vtulka tagidagi halqasimon o‘tishda joylashgan. Uning 8,9758 MPa qiymati oq cho‘yanning mustahkamlik mezoni bilan keyin alohida bog‘lanadi. Maksimal ko‘chish 0,008020 mm bo‘lib, periferik sohada kuzatiladi. Demak, eng katta siljish va kuchlanish bir nuqtada joylashishi shart emas. Asosiy maydonning ekstremumlari 4-jadvalda jamlandi [2].



4-rasm. Standart nasosda bosh kuchlanish σ_1, MPa. Asl ANSYS maydoni; maksimum 8,9758 MPa [2, 2.13-rasm]

4-jadval

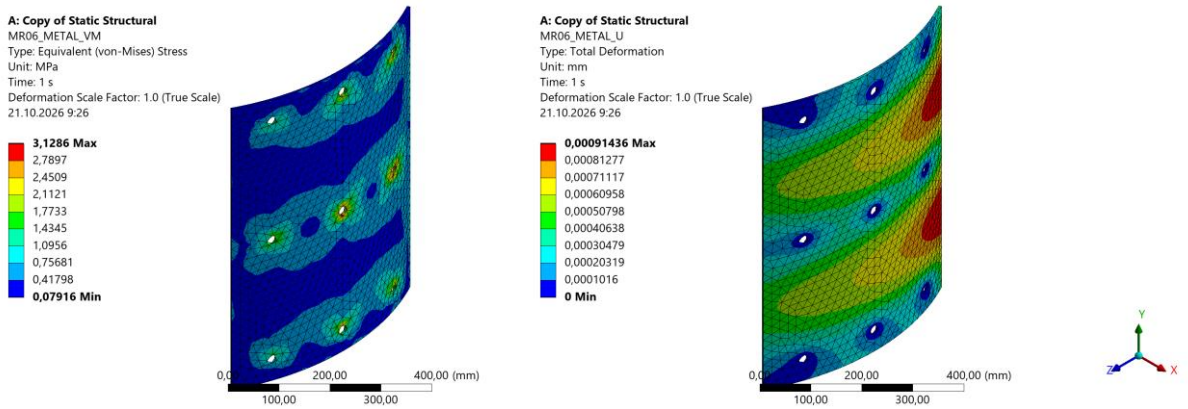
ANSYS natijalaridan ajratilgan nazorat qiymatlari [2, 3]

Hisob sohasi va javob	Minimum	Maksimum	Birlik
Nasos umumiy siljishi	0,000735	0,008020	mm
Nasos von Mises kuchlanishi	0,0128	7,8362	MPa
Nasos bosh kuchlanishi σ_1	−0,2822	8,9758	MPa
Segment metall siljishi	0	0,000914	mm
Segment metall σVM	0,079160	3,128568	MPa
Rezina umumiy siljishi	0,0000415	2,246394	mm

Valga tutashishdagi moment 3 821,493 N·m bo‘lib, qo‘yilgan momentdan modullar bo‘yicha 0,0391 % farq qiladi. Bu nazorat global yuk uzatilishini tekshiradi; mahalliy maksimumning to‘rga mustaqilligini o‘z-o‘zidan tasdiqlamaydi. Butun silindrga radial bosimning kichik yig‘indi reaksiyasi ham nasosdagi haqiqiy gidravlik radial kuchga tenglashtirilmaydi.

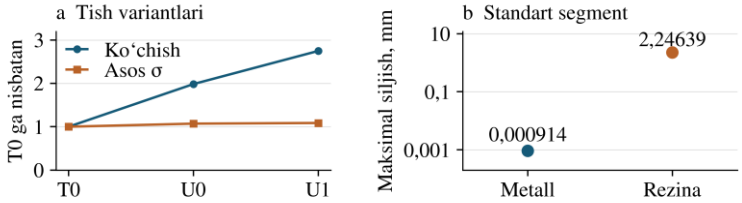
DOI: 10.65322/j.srd.06202026.25

Segment metall asosi va rezinaning turlicha javobi.



5-rasm. Segment metall asosidagi ekvivalent kuchlanish, MPa. Asl ANSYS natijasi, True Scale ×1 [3, 2.20-rasm]

Metall maksimumi teshiklar yaqinida 3,128568 MPa; rezina bosh deformatsiyalari +11,58435 % va −10,60685 %. Rezinaning qaytuvchan siljishi metallnikidan katta. Nazorat metallning teshik qirralari, protektor o‘yiqlari va qatlamlar tutashuviga qaratiladi.



6-rasm. Qiyosiy ko‘rsatkichlar: a — tish javoblari T0ga nisbatan [1]; b — metall va rezina siljishi, logarifmik ordinata [3]. Grafiklar sonli jadvallardan qayta chizildi

Natijalarni talqin qilish va modelni rivojlantirish. Standart segmentda rezina va metallning Umax nisbatlari taxminan 2 457 ga teng; bu nisbat mustahkamlik yoki resurs ustunligi emas. Geometriya, material bikrligi va tayanchlar har xil bo‘lgani sababli faqat E modullari nisbatidan siljishni aniqlab bo‘lmaydi. Rezinadagi 10 % dan katta mahalliy deformatsiya chiziqli material kartasini tajribada moslashtirilgan giperelastik model va katta deformatsiya sozlamasi bilan tekshirish zarurligini bildiradi [7].

Qatlamli segmentda metall qalinligi bo‘yicha elementlar soni, ν = 0,49 dagi hajmiy javob va kontakt bikrligiga sezgirlik keyingi tekshiruv dasturiga kiradi. Bog‘langan kontakt orqali yelim ajralishi isbotlanmaydi; buning uchun mustaqil mustahkamlik yoki zarar to‘planishi modeli kerak. Nasosda statik o‘tish zonasi aniqlanishi charchash, yeyilish va darz tarqalishi hisobining o‘rnini bosa olmaydi.

Xulosa. Kritik zonani aniqlash materialga mos javob, aniq yuk uzatish sxemasi va mahalliy to‘r nazoratiga asoslanishi kerak. Futerovkada U1 ko‘chishi T0dan 2,750 marta yuqori bo‘lsa-da, asos o‘rtacha kuchlanishi 1,086 marta ortdi. Nasosda bosh cho‘zuvchi maksimum vtulka o‘tishida 8,9758 MPa, segment metallida teshiklar atrofidagi maksimum 3,128568 MPa bo‘ldi. Amaliy tavsiya — ushbu zonalarni geometriya, material va tajriba nazoratining alohida obyektlari sifatida tekshirish. Hisoblar kritik joylarni belgilaydi; xizmat muddatini esa tegishli ekspluatatsion model va sinov tasdiqlaydi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Pardayev R.K. C-160 markali jag‘li maydalagich qurilmasi futerovka plitalari tishlarining ratsional profilini asoslash, yeyilishbardoshligini oshirish: dissertatsiya qo‘lyozmasi. – Toshkent, 2026. – II bob.

DOI: 10.65322/j.srd.06202026.25

2. Mirqodirov Sh.T. 10ГР8Л markali pulpa nasosi qurilmasini takomillashtirish, detal materialini asoslash: dissertatsiya qo‘lyozmasi. – Toshkent, 2026. – II bob, D ilova.

3. Pirnazarov Sh.X. Lentali konveyer qurilmasining baraban qoplamasi yeyilishbardoshligini oshirish, parametrlarini asoslash: dissertatsiya qo‘lyozmasi. – Toshkent, 2026. – II bob, F ilova.

4. Lindqvist M., Evertsson C.M. Liner wear in jaw crushers // Minerals Engineering. – 2003. – Vol. 16, No. 1. – P. 1–12. – DOI: 10.1016/S0892-6875(02)00179-6.

5. Walker C.I., Robbie P. Comparison of some laboratory wear tests and field wear in slurry pumps // Wear. – 2013. – Vol. 302, No. 1–2. – P. 1026–1034. – DOI: 10.1016/j.wear.2012.11.053.

6. Persson B.N.J. Conveyor belt drive physics // Tribology Letters. – 2020. – Vol. 68. – Art. 17. – DOI: 10.1007/s11249-019-1256-6.

7. Ansys 2024 R2 Documentation: Mechanical User’s Guide §17.6.3.6; Contact Technology Guide §10.1; Structural Analysis Guide §8.5.1.2. – Canonsburg: Ansys, Inc., 2024. – URL: https://ansyshelp.ansys.com.