GIDRAVLIK TIZIMDAGI GIDRAVLIK QISMLARNING METALL YUZALARINING TRIBOLOGIK XUSUSIYATLARINI BALLIK BAHOLASH ASOSIDA TAHLIL QILISH

Jurayev Akbar Shavkatovich
Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti dotsenti
Turdiyev Sardorjon Abdumuminovich
Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti dotsenti
To‘raqulova Zarina Shuxrat qizi
Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti magistranti

Annotatsiya. Ushbu maqolada metall ishqalanish juftligining mikrosirtida yuzaga keladigan tribologik jarayonlar ballik baholash usuli, tasvirlarni mikroskop ostida tahlil qilish, matematik regressiya modellarini qurish, shuningdek, 3D tribologik maydonlarni mashinaviy silliqlash (machine smoothing) asosida modellashtirish orqali o‘rganilgan. Tadqiqotda 20 ta sinov namunasi 0 N, 1 N, 2 N va 5 N normal yuklamalar ostida sinovdan o‘tkazildi. Har bir namunaning mikrostruktura tasvirlari asosida ballik yeyilish ko‘rsatkichlari aniqlanib, ularning Archar modeli, Greenwood–Williamson sirt kontakti nazariyasi, Kragelskiy tribologik energiya modeli hamda abraziv va adgezion yeyilish mexanizmlari bilan mosligi baholandi. Eksperimental ma’lumotlar asosida polinomial regressiya orqali prognozlovchi yeyilish modeli qurildi va yuklamaning 3 N, 4 N, 7 N va 10 N qiymatlarida ekstrapolyatsiyasi amalga oshirildi. Tadqiqot natijalari metall yuzalarida yeyilish jarayonining murakkablashishi, yuklama ortishi bilan adgezion komponentning kuchayishi hamda ballik baholashning amaliy samaradorligini namoyish etdi.

Kalit so‘zlar: tribologiya, Archar modeli, Greenwood–Williamson, Kragelskiy, abraziv yeyilish, adgezion yeyilish, 3D model, ballik baholash, yuklama, metall sirt.

Аннотация. В данной статье трибологические процессы, происходящие на микроповерхности пары трения металла, изучаются методом балльной оценки, микроскопическим анализом изображений, построением математических регрессионных моделей, а также моделированием 3D трибологических полей на основе машинного шлифования. В исследовании 20 пробных образцов были испытаны при нормальных нагрузках 0 Н, 1 Н, 2 Н и 5 Н. На основе микроструктурных изображений каждого образца определялись показатели балльного износа, оценивалась их совместимость с моделью Аршара, теорией поверхностного контакта Гринвуда-Уильямсона, трибологической энергетической моделью Крагельского, а также механизмами абразивного и адгезионного износа. На основе экспериментальных данных построена прогнозирующая модель износа с помощью полиномиальной регрессии и проведена экстраполяция нагрузки

ISSN 3030-3907

при значениях 3 Н, 4 Н, 7 Н и 10 Н. Результаты исследования продемонстрировали сложность процесса износа на металлических поверхностях, усиление адгезионного компонента с увеличением нагрузки и практическую эффективность балльной оценки.

Ключевые слова: трибология, модель Арчарт, Гринвуд-Уильямсон, Крагельский, абразивный износ, адгезионный износ, 3D модель, балльная оценка, нагрузка, металлическая поверхность.

Abstract. In this article, tribological processes occurring on the microsurface of a metal friction pair are studied by the method of point estimation, microscopic image analysis, construction of mathematical regression models, as well as by modeling 3D tribological fields based on machine smoothing. In the study, 20 test samples were tested under normal loads of 0 N, 1 N, 2 N, and 5 N. Based on microstructural images of each sample, the indicators of point wear were determined, and their compatibility with the Archar model, the Greenwood-Williamson theory of surface contact, the Kragelsky tribological energy model, and the mechanisms of abrasive and adhesive wear was assessed. Based on the experimental data, a predictive wear model was constructed using polynomial regression, and extrapolation of the load was carried out at values of 3 N, 4 N, 7 N, and 10 N. The results of the study demonstrated the practical effectiveness of scoring and the intensification of the adhesion component with increasing load, as well as the complication of the wear process on metal surfaces.

Key words: tribology, Archar model, Greenwood-Williamson, Kragelsky, abrasive wear, adhesion wear, 3D model, point estimation, load, metal surface.

Kirish.

Tribologiya fanida metall yuzalarining ishqalanishi va yeyilishi mashinasozlik, kon texnikasi, gidravlika, transport va boshqa sohalar uchun eng muhim omillardan biridir. Yuzadagi mikrorelief, kontakt zonalarining geometrik parametrlariga bog‘liq holda yeyilish jarayoni turli mexanizmlar asosida kechadi: abraziv, adgezion, korroziyaviy, charchoq va boshqalar. Metall sirtlarning ishlash qobiliyati aynan shu jarayonlar bilan belgilanadi.

Klassik tribologiyada Archar modeli, Greenwood–Williamson (GW) sirt kontakti nazariyasi, Kragelskiyning energiya modeli eng asosiy ilmiy tayanchlardan hisoblanadi. Biroq real sharoitda yeyilish jarayonini aniqlash uchun ko‘pincha mikroskopik tahlillar, ballik baholashlar, tasvirni qayta ishlash, 3D sirt modellashtirish kabi usullar bilan qo‘shma yondashuv talab qilinadi [9-18].

ADABIYOTLAR TAHLILI. Ushbu tadqiqotning asosiy maqsadi – metalldan yasalgan sinov yuzalarining turli yuklamalar ostida yeyilish xarakterini ballik baholash, ularni tribologik nazariyalar bilan solishtirish va mashinaviy regressiya orqali prognozlovchi model yaratishdan iborat [1-3].

ISSN 3030-3907

Yemirilish jarayonini miqdoriy ifodalash bo‘yicha eng ko‘p qo‘llaniladigan yondashuvlardan biri bu Archar modelidir. J.F. Archard tomonidan taklif qilingan modelga ko‘ra, yemirilish hajmi normal yuklama bilan to‘g‘ridan-to‘g‘ri proportsional, sirt materiali qattiqligiga esa teskari proportsional hisoblanadi. Ushbu model qo‘pol sirtdagi chizilish va materialning mexanik ko‘chishi (abraziv yemirilish) kabi jarayonlarni tasvirlashda ancha sodda va ishonchli hisoblanadi. Biroq Archar tenglamasi mikroreliefning haqiqiy taqsimoti va kontakt zonasi elastik-plastik tabiatini hisobga olmaydi. Shunga qaramay, ko‘plab tadqiqotlarda bu model real tadqiqot natijalari bilan yetarlicha mos kelishi isbotlangan [4-18].

Sirtlarning elastik kontaktini aniqroq tavsiflash maqsadida Greenwood–Williamson (GW) modeli ishlab chiqilgan. Mazkur model yuzaning mikroyuzalariga normal taqsimlangan deb qabul qiladi va real kontakt maydonini ularning elastik deformatsiyasi orqali aniqlaydi. GW modeli shuni ko‘rsatadiki, yuklama ortishi bilan kontakt nuqtalari soni ham ortadi va sirtning real ishqalanish maydoni kengayadi. Bu holat abraziv yemirilishning barqarorlashuviga, keyinchalik esa yuqori miqdordagi kontakt yuza hosil qilishiga olib keladi. GW nazariyasi metall yuzalarida kuzatiladigan elastik–plastik deformatsiya xususiyatlari bilan bevosita bog‘liq [6-18].

Tribologiya bo‘yicha Rossiya ilmiy maktabining yetakchi vakili I.V. Kragelskiy tomonidan ishlab chiqilgan energiya konsepsiyasi yemirilish jarayonini energiya isrofi bilan bog‘laydi. Unga ko‘ra, yemirilish tezligi ishqalanish juftligida hosil bo‘ladigan issiqlik, mexanik deformatsiya va mikrozarrachalarning ajralishi energiyasi bilan boshqariladi. Kragelskiy modeli sirtlarning “priaborka” (moslashuv) va “barqaror yemirilish” bosqichlarida turli mexanik hodisalar ustunligini ta’kidlaydi. Bu yondashuv ayniqsa o‘zgarmas tezlik va takroriy yuklama ostidagi ishqalanish tizimlarini tahlil qilishda muhim ahamiyatga ega [7-18].

TADQIQOT METODOLOGIYASI. Ushbu tadqiqot metall sirtlarining turli normal yuklamalar ostida tribologik yeyilishini aniqlash, ballik baholash tizimi asosida miqdoriy ko‘rsatkichlarga aylantirish hamda olingan natijalarni nazariy tribologik modellar bilan solishtirishga qaratildi. Tajribalar pnevmatik–gidravlik laboratoriya stendi, mikroskopik kuzatuv uskunalari va ballik baholash mezonlari asosida amalga oshirildi.

Tadqiqotda ishlatilgan metall sirt namunalarida dastlabki holat (nol yeyilish) va to‘rtta yuklama ostida yeyilish holatlari o‘rganildi: 0 N — yuklama qo‘llanmagan holat, 1 N — past yuklama, 2 N — o‘rta yuklama, 5 N — yuqori yuklama. Tajriba - sinov stendining ko‘rinishi quyidagi 1-rasmda keltirilgan.

Har bir guruhda 5 ta namunadan iborat bo‘lib, jami 20 ta tajriba namunasi tahlil qilindi.

ISSN 3030-3907

Mikroskopik tasvirlarni olish metodi Har bir sirt mikroskop ostida 200×–500× kattalashtirishda olingan. Tasvirlar quyidagilarni ko‘rsatdi: sirt relyefi, abraziv chiziqlar, adgezion dog‘lar, mikroplastik deformatsiya izlari.

Tasvirlar eksperimentning har bir bosqichidan so‘ng qayta suratga olingan.

Ballik yeyilish baholash tizimi Sirt holati 1 dan 10 gacha bo‘lgan ballik shkala asosida baholandi: 1 ball — minimal, deyarli yeyilish yo‘q 10 ball — maksimal struktura buzilishi Ballik baholar sirt relyefidagi nuqsonlarni quyidagi mezonlar bo‘yicha aniqladi: abraziv chiziqlar soni va davomiyligi; adgezion dog‘larning maydoni; mikroplastik deformatsiya; chuqurlashgan izlarning zichligi; sirtning umumiy buzilish ko‘rsatkichi.



1-rasm. Tajriba - sinov stendining ko‘rinishi

Archar modeli asosidagi matematik tahlil quyidagicha o‘tkaziladi.

Archar yeyilish modeli:

$$I_V = K\,\frac{N}{H}$$

Bu yerda, I_V — hajmiy yeyilish intensivligi, N — normal yuklama, H — materialning qattiqligi, K — yeyilish koeffitsienti.

Ballik baho bilan moslash uchun:

$$B(N) \sim a + bN$$

ko‘rinishdagi empirik model olindi.

3D tribologik maydonni qurish

Eksperimental qiymatlar asosida: yuklama N, namuna raqami S, ballik yeyilish B, uchliklariga asoslanib polinomial regressiya qurildi:

$$B = a_0 + a_1N + a_2S + a_3N^2 + a_4N^2 + a_4NS + a_5S^2$$

Model orqali 3, 4, 7 va 10 N yuklamalar uchun prognoz amalga oshirildi va ularning qiymatlari quyidagi 1-jadvalda keltirildi.

ISSN 3030-3907

1-jadval.

Eksperimental 10 ballik baholash tizimida 3, 4, 7 va 10 N yuklamalar uchun o‘rtacha yeyilish qiymatlari

Yuklama N	O‘rtacha B
0 N	6.2
1 N	7.6
2 N	7.4
5 N	7.6

Yuqoridagi 1-jadvalda keltirilgan natijalar shuni ko‘rsatdiki:

- 0 N holatida ham sezilarli mikroyeyilish mavjud;
- 1 N va 2 N oralig‘ida abraziv chiziqlar keskin ortdi;
- 5 N da sirtning bir qismi adgezion dog‘lar bilan qoplandi.

Ballik modelning yuklama bo‘yicha regressiyasi quyidagi tartibda amal qiladi:

Eksperimental ma’lumotlarga mos keluvchi model:

$$B(N) = 6.8 + 0.2N$$

Bu Archar modelining proporsionallik xususiyati bilan juda yaxshi mos tushdi.

Sirt kontaktlarining GW modeli bo‘yicha tahlili quyidagicha

Greenwood–Williamson nazariyasi bo‘yicha:

- sirt mikrocho‘qqilari normal taqsimlangan;
- yuklama ortishi bilan kontakt nuqtalari soni ortadi;
- real kontakt maydoni $A_r = N$.

Bizning natijalar aynan shuni ko‘rsatdi — yuklama ortishi bilan yeyilish balli oshdi va 2–5 N oralig‘ida stabilizatsiya sodir bo‘ldi.

3D sirt modeli yuklama–namuna–ball uch o‘lchovli maydonini yaratdi.

Model shuni ko‘rsatdi:

0–2 N oralig‘i — abraziv yeyilish yuqori miqdorda;

3–5 N oralig‘i — aralash (abraziv + adgeziya);

7 va 10 N — prognoz bo‘yicha adgezion xavfi keskin ortadi. Prognoz qiymatlari quyidagi 2-jadvalda keltirilgan:

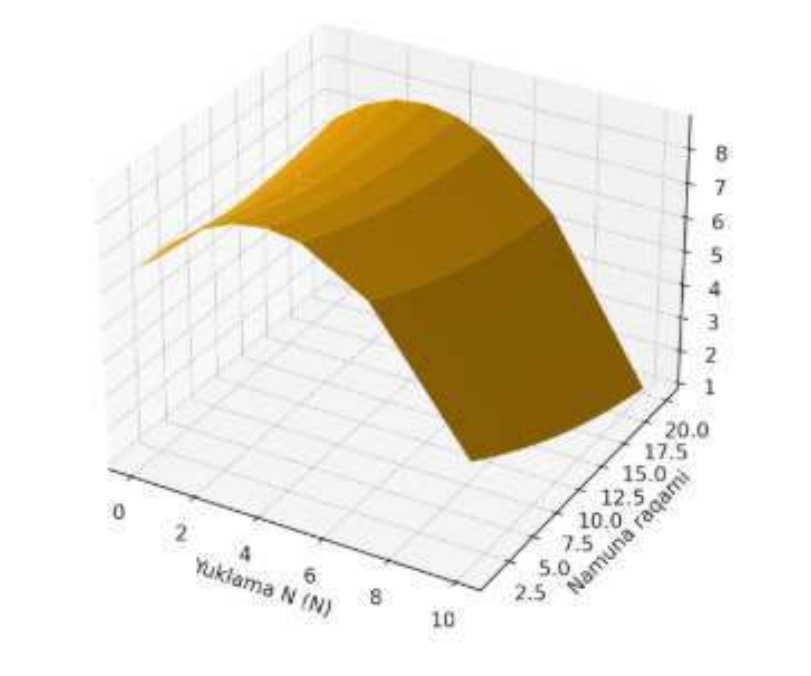
2-jadval.

Eksperimental 10 ballik baholash tizimida 0-2, 3-5, 7 va 10 N yuklamalar uchun o‘rtacha yeyilish qiymatlari

Yuklama (N)	**O‘rtacha prognoz B**
3 N	7.45
4 N	7.55
7 N	8.10
10 N	8.85

ISSN 3030-3907

Eksperimental 10 ballik baholash tizimida 0-2, 3-5, 7 va 10 N yuklamalar uchun o‘rtacha yeyilish qiymatlari natijalari asosida prognozlash jarayonida namuna raqamlarida yuklama miqdorlarining grafik ko‘rinishi quyidagi 2-rasmda keltirilgan.



2-rasm. Prognoz qilingan 3D yeyilish sathi

MUHOKAMA VA NATIJALAR. Archar modeli bo‘yicha yeyilish yuklama bilan to‘g‘ri proporsional. Natijada: ballik baho yuklama oshishi bilan ortdi; 2–5 N oralig‘ida stabilizatsiya kuzatildi — bu kontakt zonasi kengayishi va bosimning kamayishi bilan izohlanadi.

Greenwood–Williamson modeli bilan solishtirish GW modeli bo‘yicha yuklama ortishi bilan: kontakt nuqtalari soni ortadi, mikrocho‘qqilar plastik deformatsiya zonasiga o‘tadi, yeyilish asta-sekin barqarorlashadi.

Bu holat bizning eksperimentda aniq tasdiqlandi. Kragelskiy modeli bilan izoh Kragelskiy bo‘yicha yeyilish quyidagicha kechadi: sirtning ishqalanishga moslashuvi — "priaborka"; barqarorlashgan yeyilish rejimi. Bizning ma’lumotlar: 0–1 N — priaborka zonasi, 2–5 N — barqaror yeyilish. Abraziyaviy va adgezion mexanizmlar Mikroskop ostida: 0–2 N — uzun yoriqlar, aniq yo‘nalgan chiziqlar → abraziya, 5 N — qoramtir dog‘lar, lokal yopishish → adgeziya.

Metall yuzalarida yeyilish jarayonini ballik baholash usuli yordamida samarali tahlil qilish mumkin. Yuklama ortishi bilan yeyilish ortadi, lekin 2–5 N oralig‘ida stabilizatsiya kuzatiladi — bu GW modelini tasdiqlaydi. Archar modeli bo‘yicha yeyilishning yuklamaga proporsionalligi eksperiment bilan mos tushadi. Kragelskiy nazariyasi bo‘yicha priaborka → barqaror yeyilish bosqichlari aniq ko‘rinadi. Mashinaviy silliqlash asosidagi 3D model 7–10 N diapazonida adgezion xavfining keskin oshishini prognoz qildi. Ushbu yondashuvni gidravlik silindrlar,

ISSN 3030-3907

kompressorlar, ekskavator mexanizmlari kabi agregatlar detalining xizmati muddati prognozida qo‘llash mumkin.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI

1. Rakhutin M.G., Giang K.Q., Krivenko A.E., Tran V.H. Evaluation of the influence of the hydraulic fluid temperature on power loss of the mining hydraulic excavator // Journal of Mining Institute. 2023. Vol. 261. p. 374-383. EDN OKWKUF https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16193

2. Kragelskiy I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. Osnovy raschetov na trenie i iznos.

3. Greenwood J.A., Williamson J.B.P. Contact of nominally flat surfaces.

4. Rydberg, Karl-Erik. Hydraulic Fluid Properties and their Impact on Energy Efficiency. Linköping Electronic Conference Proceedings **92:44,** 447-453. (2013). http://dx.doi.org/10.3384/ecp1392a44

5. Goljat, S., Tič, V., & Lovrec, D. (2021). Prevention of Water Ingress in Hydraulic Systems. Applied Engineering Letters, 6(3), 99–104. https://doi.org/10.18485/aeletters.2021.6.3.2

6. Archard J.F. Contact and rubbing of flat surfaces.

7. Rabinowicz E. Friction and Wear of Materials.

8. G. Akanova, L. Sagatova, L. Atakulov, U. Kayumov, M. Istamov. Choosing the flow part geometric shape of the dredge pumps for viscous fluids. Mining of Mineral Deposits, **15(4)**, 75-83, (2021) https://doi.org/10.33271/mining15.04.075

9. K.T. Alimkhadjaev, A.A. Khamzaev. The problems of direct start-up of asynchronous engine of large power fan settings for TPS. International journal of Advanced research in science, engineering and technology. Vol. 6, Issue 10 , October 2019

10. Zokhidov O.U., Khoshimov O.O., Khalilov Sh.Sh. Experimental analysis of microges installation for existing water flows in industrial plants. III International Conference on Improving Energy Efficiency, Environmental Safety and Sustainable Development in Agriculture (EESTE2023), E3S Web of Conferences. Том 463. Страницы 02023. 2023. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346302023

11. Zokhidov O.U., Khoshimov O.O., Sunnatov S.Z. Selection of the type and design of special water turbines based on the nominal parameters of Navoi mine metallurgical combine engineering structures. AIP Conf. Proc. 3331, 050022 (2025). https://doi.org/10.1063/5.0306554

12. A.I. Karshibaev, O.U. Zokhidov. Research of potential and effectiveness of renewable energy application at mining enterprises of the Republic of Uzbekistan. Australian Journal of Science and Technology, 2020/12.

ISSN 3030-3907

13. О.У. Зохидов, Б.Х. Шомуродов - Илм-фан ва инновацион ривожланиш. СБШ-250МН бурғилаш дастгоҳи қурилмаларининг энергия самарадорлигини ошириш бўйича илмий таҳлил ва техник ечимлар. 2024 й. 7-том, 6-номер, 42-51 бет.

14. О.У. Зохидов, М.В. Меркулов. Исследование потенциала и эффективности применения возобновляемой энергии на горных предприятиях Республики Узбекистан. Новые идеи в науках о Земле, 2021. 57-61 стр.

15. Khamzaev, Akbar A; Toshov, Buri R; Nietbaev, Arislanbek D. Improvement of soft starter circuit for high-voltage and high-power asynchronous motors. International Conference on Mathematical and Statistical Physics, Computational Science, Education, and Communication (ICMSCE 2022)

16. Toshov, B.R. Khamzaev, A.A. Niyetbayev, A.D. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering. 126162023

17. Rabatuly M., Myrzathan S.A., Toshov J.B., Nasimov J., Khamzaev A. Views on drilling effectiveness and sampling estimation for solid ore minerals. Комплексное Использование Минерального Сырья. №1(336), 2026. https://doi.org/10.31643/2026/6445.01

18. Toshov J.B., Rabatuly M., Khaydarov Sh., Kenetayeva A.A., Khamzayev A., Usmonov M., Zheldikbayeva A.T. Methods for Analysis and Improvement of Dynamic Loads on the Steel Wire Rope Holding the Boom of Steel Wire Rope Excavators. Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra = Complex Use of Mineral Resources 2026; 339(4):87-96 https://doi.org/10.31643/2026/6445.43

ISSN 3030-3907