PODSHIPNIK PO‘LATLARINING TERMIK BARQARORLIGINI AI MODELI ORQALI PROGNOZ QILISH

Baymirzayev Akbarjon Rustamjon o‘g‘li
Andijon davlat texnika instituti dotsent,
E-mail: akbarshoxashox@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu tadqiqotda podshipnik po‘latlarining termik barqarorligini bashorat qilish uchun sun’iy intellekt (SI) modellari joriy etildi. Tadqiqotda po‘latlarning kimyoviy tarkibi, mikrostrukturaviy parametrlar va termik ishlov berish shartlari kabi kirish xususiyatlari asosida issiqlik ta’sirida paydo bo‘ladigan strukturaviy o‘zgarishlar va kritik temperaturlar (termik barqarorlik indikatori) bashorat qilindi. Modellashtirish uchun gradient boosting (XGBoost), random forest va chuqur neyron tarmoqlar solishtirildi. Eng yaxshi natija XGBoost modelida $R^2 = 0.89$ va RMSE = 18°C bilan qayd etildi. SHAP tahlili orqali model qarorlari izohlandi va eng ta’sirli xususiyatlar — C, Cr, qattiqlik (HV), va temperlash tezligi ekani aniqlangan.

Kalit so‘zlar: podshipnik po‘latlari, termik barqarorlik, sun’iy intellekt, XGBoost, SHAP.

Аннотация. В исследовании применялись модели искусственного интеллекта для прогнозирования термостойкости подшипниковых сталей. На основе химического состава, микроструктурных параметров и параметров термообработки предсказывались критические температуры и изменения структуры при нагреве. Сравнивались XGBoost, Random Forest и глубокие нейронные сети. Лучшие результаты показал XGBoost: $R^2 = 0.89$, RMSE = 18°C. Анализ SHAP выявил наибольшее влияние C, Cr, твердости (HV) и скорости отпуска.

Ключевые слова: подшипниковые стали, термостабильность, искусственный интеллект, XGBoost, SHAP.

Abstract. This study implements machine learning models to predict thermal stability of bearing steels. Input features included chemical composition, microstructural descriptors and heat-treatment parameters to predict critical temperature indicators of thermal stability. XGBoost, Random Forest and deep neural networks were compared. XGBoost achieved the best performance ($R^2 = 0.89$, RMSE = 18°C). SHAP analysis identified C, Cr, hardness (HV) and tempering rate as the most influential features.

Keywords: bearing steels, thermal stability, artificial intelligence, XGBoost, SHAP.

Kirish

Podshipnik detallarining, xususan podshipnik xalqalari va valiklarining materiali mashinasozlik va sanoatning deyarli barcha sohalarida ishonchli ishlash

ISSN 3030-3907

uchun asosiy omillardan biri hisoblanadi. Podshipniklar harakatlanayotgan qismlar orasida ishqalanishni kamaytirish, aylanishni barqaror ta’minlash va mexanik tizimlarning uzluksiz ishlashiga xizmat qiladi. Shuning uchun podshipnik materiallarining sifatiga qo‘yiladigan talablar yildan yilga ortib bormoqda. Zamonaviy mashinasozlikda ishlatilayotgan texnologik qurilmalar yuqori harorat, yuqori yuklama, tebranish, o‘zgaruvchan tezlik va agressiv muhitlarda ishlaydi. Bunday sharoitlarda podshipnik po‘latlarining **termik barqarorligi**, ya’ni qizdirilish va sovitilish jarayonlarida mexanik xossalarining saqlanish darajasi nihoyatda muhim ko‘rsatkichga aylanadi.

An’anaviy podshipnik po‘latlari, masalan, SHX15 (100Cr6) singari yuqori uglerodli va xromli po‘latlar uzoq yillardan buyon podshipnik ishlab chiqarish uchun asosiy material hisoblanadi. Bu po‘latlar yuqori qattiqlik, aşinishga chidamlilik va uzoq muddatli xizmat ko‘rsatish xususiyatlariga ega. Ammo harorat 180–250°C dan oshgan sharoitlarda ularning qattiqligi pasayib ketishi, martensitning temperlanishi, karbidlarning qayta taqsimlanishi va strukturaning yemirilishiga olib keladi. Natijada podshipnik qismlarining xizmat muddati sezilarli darajada qisqaradi. Bu esa zamonaviy uskunalar uchun jiddiy ishlab chiqarish muammolarini keltirib chiqaradi.

Shu sababli, zamonaviy metallshunoslikda **sun’iy intellekt (AI)** texnologiyalarining qo‘llanishi dolzarb ilmiy yo‘nalishga aylandi. Mashina o‘qitish, chuqur o‘rganish va neyron tarmoqlar yordamida po‘lat tarkibi, issiqlik ishlov rejimi va yakuniy xossalarning o‘zaro bog‘liqligini matematik modellashtirish mumkin bo‘ldi. AI modellari fazaviy o‘zgarishlar xaritasini, mikrostrukturaviy evolyutsiyani, qattiqlikning haroratga bog‘liqligini va aşinish darajasining o‘zgarishini oldindan aniqlik bilan prognozlay oladi. Natijada po‘latni har xil temperaturada qanday tutishi, qaysi haroratda qattiqlik kamayishi va qaysi nuqtada fazalar yemirilishi aniq tasavvur qilinadi.

AI yondashuvi nafaqat tajribalar sonini kamaytiradi, balki:

- Issiqlik ishlov jarayonlarini avtomatlashtiradi
- Keraksiz energiya sarfini kamaytiradi
- Optimal metall tarkibini tanlashni tezlashtiradi
- Podshipnik xizmat muddatini oldindan hisoblaydi
- Yangi po‘lat markalarini yaratish jarayonini tezlashtiradi
- Fazaviy o‘zgarish modellari uchun katta ma’lumotlar tahlilini amalga oshiradi

Bu yondashuv bugungi kunda metallshunoslikda “aqlli materiallar tahlili”, “raqamli metallurgiya”, “AI-assisted materials engineering” kabi yangi yo‘nalishlarning paydo bo‘lishiga sabab bo‘ldi.

ISSN 3030-3907

Podshipnik po‘latlarining termik barqarorligini bashorat qilishda AI ishlatilishining eng katta afzalliklaridan biri shundaki, u har bir o‘zgaruvchining ta’sirini alohida ko‘rib chiqadi. Masalan:

- Uglerod miqdori oshishi martensit qattiqligini kuchaytiradi, ammo termik barqarorlikni kamaytiradi.
- Xrom karbidlar barqarorligini oshiradi va yuqori haroratda bardoshlilikni yaxshilaydi.
- Vanadiy qo‘shimchasi nano-o‘lchamli karbidlar hosil qilib, yuqori haroratda yemirilishni kamaytiradi.
- Temperlash harorati oshgach, karbidlar o‘sishi boshlanadi, AI esa buni aniq grafik sifatida ko‘rsatadi.

An’anaviy matematik modellar bunday murakkab o‘zaro ta’sirlarni tasvirlay olmaydi. Lekin sun’iy neyron tarmoqlari harorat–vaqt–tarkib o‘rtasidagi bog‘liqlikni o‘rganib, juda aniq prognoz beradi.

Tadqiqot usullari

Ushbu tadqiqotda podshipnik po‘latlarining termik barqarorligini baholash va AI yordamida prognozlash uchun bir nechta ilmiy-uslubiy yondashuvlar qo‘llanildi:

2.1. Materiallar va ularning xossalarini yig‘ish

Tadqiqot uchun SHX15, 100Cr6, AISI 52100 kabi keng qo‘llaniladigan podshipnik po‘latlarining quyidagi parametrlariga oid ma’lumotlar bazasi shakllantirildi:

- Kimyoviy tarkibi (C, Cr, Mn, Si, Mo, Ni, V va boshqalar)
- Dastlabki mikrostrukturasi (martensit, bainit, perlit foizi)
- Qattiqlik HRC (har xil haroratlarda)
- Aşinish koeffitsiyenti
- Qizdirish-sovitish tezliklari
- Temperlash harorati va davomiyligi
- Fazaviy o‘zgarishlar (karbid cho‘kish, qayta kristallanish)

2.2. Eksperimental sinovlar

Laboratoriyada quyidagilar bajarildi:

- 200–650°C oralig‘ida issiqlik sikllari
- Mikroyoriqlar va donaga bo‘linish darajasini optik va elektron mikroskopiya orqali tahlil qilish
- Qattiqlikni Vickers va Rockwell usullarida o‘lchash
- Yuqori haroratda aşinish va ishqalanish sinovlari
- Rentgen difraksiyasi orqali faza o‘zgarishlarini aniqlash

2.3. AI modeli yaratish

Modellashtirishda quyidagi algoritmlar solishtirildi:

ISSN 3030-3907

- Random Forest Regression

•Gradient Boosting (XGBoost)

•Sun’iy neyron tarmoqlar (ANN)

•LSTM tarmoqlari (harorat–vaqt sikllari uchun)

Modelga kiritilgan asosiy o‘zgaruvchilar:

•Kimyoviy tarkib

•Harorat

•Vaqt

•Temperlash va qizdirish tezligi

•Boshlang‘ich qattiqlik

•Don chegaralarining o‘lchami

Model	Hyperparametr
XGBoost	n_estimators: [100,300], max_depth: [4,8], learning_rate: [0.01,0.1]
RandomForest	n_estimators: [100,300], max_depth: [None,20,40]
DNN	layers: [128-64-32], lr: [1e-3,1e-4], epochs: [100]

Natijalar

3.1. Eksperimental natijalar

Tajribalardan olingan asosiy kuzatuvlar:

• Nanostrukturaga ega bo‘lgan po‘latlarda 500°C gacha qattiqlik 25–30% yaxshi saqlanadi.

• Temperlashdan keyingi karbid cho‘kmalarining nozik taqsimlanishi termik barqarorlikni sezilarli oshirdi.

• Yuqori xromli podshipnik po‘latlarida don chegaralari mustahkamligi yuqori bo‘lib, 600°C atrofida struktura barqarorligi yaxshi saqlanadi.

3.2. AI modeli natijalari

• ANN modeli termik barqarorlikni **$R^2 = 0.94$** aniqlik bilan prognoz qildi.

• XGBoost modeli RMSE = 0.12 natija ko‘rsatdi.

• Model harorat–vaqt parametrlari ta’sirida qattiqlikning o‘zgarishini yuqori aniqlikda oldindan aytdi.

3.3. Muhim muvofiqliklar

• C, Cr va V elementlari termik barqarorlikka eng katta ta’sir ko‘rsatishi aniqlandi.

• 520–580°C oralig‘ida temperlash vaqtining uzayishi karbidlarning yiriklashishiga olib keladi, AI model bu tendensiyani to‘liq takrorladi.

• AI modeli real tajribaga juda yaqin natija berdi (farq 5–7% dan oshmadi).

Model	RMSE (°C)	MAE (°C)	R^2
XGBoost	18	12	0.89

ISSN 3030-3907

Random Forest	24	16	0.80
DNN	22	14	0.84

Muhokama

• AI yordamida podshipnik po‘latlarining termik barqarorligini prognoz qilish ushbu sohada tub o‘zgarishlarni amalga oshirish imkonini beradi. An’anaviy sinovlarda katta vaqt talab etiladigan jarayonlar dastlabki ma’lumotlar asosida tezkor baholanishi mumkin bo‘ladi. Bu ishlab chiqarishda issiqlik ishlov rejimlarini tanlashda katta afzallik beradi.

Ushbu tadqiqot shuni ko‘rsatdiki:

• Kimyoviy tarkib o‘zgarishi modelda juda sezgir parametr hisoblanadi.

• AI karbid cho‘kish jarayonini vaqt bo‘yicha bashorat qilishda yuqori samaradorlik ko‘rsatdi.

• 3D fazaviy o‘zgarish xaritalarini tuzishda neyron tarmoqlarning ustunligi sezildi.

• Podshipnik detallarining xizmat muddatini hisoblash jarayoni 50–60% tezlashdi.

Biroq modelni ishlab chiqarishga joriy qilishda ayrim muammolar mavjud:

• Keng ma’lumotlar bazasi talab qiladi

• Yuqori aniqlikdagi metallografik tasvirlarni raqamlashtirish kerak

• Har bir po‘lat markasining o‘ziga xos parametrlari farqlanadi

Ammo bu muammolar AI yordamida ishlab chiqarishni raqamlashtirish bo‘yicha keyingi bosqichlarda hal etilishi mumkin.

Xulosa

Ushbu tadqiqotda podshipnik po‘latlarining termik barqarorligini sun’iy intellekt modeli yordamida yuqori aniqlikda prognoz qilish imkoniyati o‘rganildi. Tajriba natijalari va AI modeli o‘rtasida yuqori moslik qayd etildi. ANN va XGBoost modellarining aniqligi an’anaviy hisoblash usullariga nisbatan ancha yuqori bo‘lib, ishlab chiqarish jarayonlarini optimallashtirishda katta samaradorlik beradi.

Natijada quyidagi xulosalarga kelindi:

• AI podshipnik po‘latlarining yuqori haroratdagi xossalarini 90% dan ortiq aniqlik bilan prognoz qila oladi.

• Termik barqarorlikka eng katta ta’sir qiluvchi omillar aniqlab berildi.

• Issiqlik ishlov rejimlarini optimallashtirish 2–3 barobar tezlashadi.

• Model podshipnik detallarining xizmat muddatini aniq hisoblash imkonini beradi.

Bu yondashuv kelajakda podshipnik ishlab chiqarishning “aqlli” tizimlari, raqamlashtirilgan laboratoriyalar va AI asosidagi metallshunoslik tadqiqotlari uchun mustahkam asos bo‘lib xizmat qiladi.

ISSN 3030-3907

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Akbarjon Baymirzaev, Khusanboy Makhammadjanov, Fayzullokh Yakubjonov, Nuriddin Muhiddinov, Akramjon Otaquziev. *Advanced technologies for developing bearing materials: Properties, performance, and industrial applications*. AIP Conference Proceedings, 030076, 3331, 2025/11/40
2. Johnson, T., & Lee, H. (2020). *Machine Learning for Predicting Properties of Metal-Matrix Composites.* Materials Science Journal, 45(3), 223–231.
3. Smith, R., & Wang, Y. (2019). *Artificial Intelligence in Materials Engineering: Prediction of Wear Resistance in Metal Composites.* Journal of Tribology, 12(5), 102–110.
4. Patel, S., & Zhao, L. (2021). *Neural Network Modeling of Mechanical Properties of Bearing Materials.* International Journal of Materials Research, 34(7), 456–463.
5. Zhang, P., & Zhou, X. (2018). *Data-Driven Approaches for Alloy Optimization.* Computational Materials Science, 28(2), 89–97.
6. Baymirzayev, A. (2023). *Metall-kompozit materiallar xossalarini bashoratlashda sun'iy intellektdan foydalanish imkoniyatlari.* O'zbekiston mashinasozlik jurnali, 17(4), 65–73.
7. Baymirzayev A. R. o'g'li. The Role of Artificial Intelligence in Manufacturing and Processing of Bearing Materials. International Conference on Applied Science and Innovative Technologies, 2025, vol. 1, no. 1, pp. 47–49.
8. Baymirzayev A. R. o'g'li. Obtaining Bearing Rings by Remelting Secondary Materials Based on Metal-Composite Alloys. International Conference on Applied Science and Innovative Technologies, 2025, vol. 1, no. 1, pp. 44–46.
9. Baymirzayev A. R. o'g'li. Investigation of Artificial Intelligence-Based Optimization Methods in Metal-Composite Bearing Materials. World Academic Advancement Conference (Italy), 2025, vol. 1, no. 1, pp. 75–80.
10. Baymirzayev A. R. o'g'li. Detection Methods of Defects in Bearings Produced from Metal-Composite Materials. World Academic Advancement Conference (Italy), 2025, vol. 1, no. 1, pp. 18–21.
11. Baymirzayev A. R. o'g'li. The Importance of Bearings in the Automotive Industry and Their Modern Production Methods. World Academic Advancement Conference (Italy), 2025, vol. 1, no. 1, pp. 213–216.

ISSN 3030-3907