

GUOLIŲ PLIENO RUTULIŲ PAVIRŠIAUS NELYGUMŲ ĮTAKOS TEPIMUI TYRIMAS

Irenijus RASTOKAS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: irenijus.rastokas@vdu.lt

Raimondas KREIVAITIS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: raimondas.kreivaitis@vdu.lt

Santrauka

Guolių plieno rutulių paviršiaus kokybė yra vienas iš veiksnių, galinčių turėti reikšmingos įtakos trinties ir dilimo procesams tepamose mechaninių sistemų trinties porose. Skirtingų gamybos serijų guolių plieno rutuliai dažnai pasižymi nevienoda paviršiaus mikrogeometrija – nuo lygaus ir poliruoto iki grublėto, pabraižyto ar turinčio kitokius defektus, šių skirtumų įtaka tribologiniam elgesiui lieka nepakankamai išnagrinėta. Šiame darbe atlikta keturių skirtingų gamybos serijų guolių plieno rutulių palyginamoji tribologinė analizė. Pradinė paviršiaus būklė įvertinta optiniu mikroskopu, medžiagos kietumas nustatytas Vikerso metodu. Tribologiniai bandymai atlikti keturių rutulių mašinoje pagal DIN 51350 standartą, naudojant variklinę alyvą SAE 5W-30. Bandymo metu fiksuojamas sukimo momentas ir trinties koeficientas, o po bandymų išmatuoti nudilimo dėmių dydžiai. Tyrimo rezultatai atskleidė ryšį tarp medžiagos kietumo, pradinės paviršiaus kokybės ir tribologinių charakteristikų: didesnio kietumo serijos pasižymėjo mažesniu trinties koeficientu ir mažesnėmis nudilimo dėmėmis. Vizualiai lygiausio paviršiaus serija demonstravo didžiausią nudilimą dėl žemesnio kietumo, kas rodo, jog kietumas yra svarbesnis ilgaamžiškumo veiksnys nei paviršiaus išvaizda. Gautos išvados gali būti naudingos inžinieriams, priimančioms sprendimus dėl guolių parinkimo ir kokybės vertinimo.

Reikšminiai žodžiai: guolių plienas, paviršiaus šiurkštumas, tribologinis tyrimas, trinties koeficientas, mikrokietumas.

Įvadas

Riedėjimo guoliai yra neatsiejama šiuolaikinių mašinų ir mechanizmų dalis, jie naudojami automobilių transmisijose, varikliuose, metalo apdirbimo staklėse, elektros varikliuose ir daugelyje kitų įrenginių. Guolių gedimas gali sukelti didelę žalą: neplanines sustojimo laiko sąnaudas, gamybos nuostolius ir papildomas priežiūros sąnaudas. Didelė dalis guolių gedimų yra siejama su jų paviršiumi, atsiranda mikrodefektai dėl trinties sukkelto nusidėvėjimo ir tepalo plėvelės irimo kontaktinėje zonoje (Morales-Espejel et al., 2015).

Guolių plieno rutulių paviršiaus kokybė yra vienas svarbiausių rodiklių, tiesiogiai susijusių su guolio tarnavimo trukme. Gamybos procesų metu guolių plieno rutuliai pereina kelis šlifavimo ir poliravimo etapus, o galutinė paviršiaus būklė gali ženkliai skirtis, priklausomai nuo gamybos serijos, naudojamos įrangos ir kokybės kontrolės griežtumo. Paviršiaus defektai: braižymai, įdubimai ar išplėšimai kenkia estetinei išvaizdai ir keičia kontaktinį įtempių pasiskirstymą bei tepalo plėvelės formavimąsi. Skirtingi tyrimai patvirtina, kad paviršiaus mikrogeometrijos pokyčiai tiesiogiai veikia tiek trinties koeficientą, tiek dilimo intensyvumą (He et al., 2025; Yuan et al., 2024).

Guolių plienui (GCr15 / AISI 52100) būdingas aukštas kietumas, paprastai 58–66 HRC po terminio apdorojimo, kuris užtikrina gerą atsparumą kontaktiniam nuovargiui ir abrazyviam dilimui. Tyrimai rodo, kad net to paties plieno kietumas gali skirtis, priklausomai nuo terminio apdorojimo režimo, o šie skirtumai turi matavimais pagrįstą įtaką dilimo atsparumui (Li et al., 2024; Zhang et al., 2024). Kietesni paviršiai paprastai formuoja mažesnes nudilimo dėmes ir pasižymi mažesniu trinties koeficientu, tačiau šis ryšys nėra visada tiesinė priklausomybė, reikia atsižvelgti ir į paviršiaus šiurkštumą ir mikrostruktūros ypatumus.

Tribologinių savybių vertinimui standartizuoti naudojamas keturių rutulių bandymo metodas pagal DIN 51350 standartą, leidžiantis kontroliuojamomis sąlygomis įvertinti tepalo ir tiriamų paviršių sąveiką. Šis metodas plačiai taikomas lyginant skirtingų medžiagų tribologinį elgesį, nes sukuria riedėjimo (slydimo) kontakto sąlygas, būdingas realiems guolių mazgams (Kumar et al., 2024). Taikant šį metodą galima kiekybiškai palyginti tiek trinties momentą ir trinties koeficientą, tiek nudilimo dėmių dydžius, kurie yra patikimi dilimo intensyvumo rodikliai.

Nepaisant to, kad atskiri parametrai yra plačiai nagrinėjami: šiurkštumas, kietumas, tepalo savybės, kompleksinis skirtingų gamybos serijų rutulių paviršiaus būklės vertinimas realaus eksploatacinio scenarijaus sąlygomis lieka nepakankamai ištirtas. Šiame darbe atliekama keturių skirtingų gamybos serijų guolių plieno rutulių palyginamoji tribologinė analizė, apimanti pradinę paviršiaus mikrogeometrinę analizę, mikrokietumo matavimus ir tribologinius bandymus vienodose sąlygose.

Tyrimo tikslas – ištirti skirtingos paviršiaus kokybės guolių plieno rutulių atsparumą dilimui tepamose trinties porose. Iškeliam tikslui pasiekti sprendžiami šie **uždaviniai**:

1. Išanalizuoti rutulių paviršiaus mikrogeometrinis parametrus ir įvertinti mikrokietumą.
2. Atlikti tribologinius tyrimus, užtikrinant vienodas bandymo sąlygas visoms tiriamųjų rutulių serijoms.
3. Ištirti susidariusius dilimo pėdsakus ir įvertinti dilimo pobūdį bei intensyvumą skirtingų serijų rutuliams.
4. Palyginti gautus tyrimo rezultatus ir nustatyti paviršiaus būklės įtaką guolių plieno rutulių dilimo procesams.

Tyrimų objektas ir metodai

Šio tyrimo objektas – skirtingos kokybės guolių plieno rutuliai, žymimi 3S, 5S, 8S, ir 22S. Visi rutuliai pagaminti iš guolių plieno (GCr15 / AISI 52100), jų skersmuo yra 12,7 mm. Serijos skiriasi vizualia paviršiaus mikrogeometrija: vieni lygūs, lyg poliruoti, o kiti grublėti, pabraižyti, turi defektų. Iš kiekvienos serijos atsitiktine tvarka buvo atrenkami 8, kad būtų galima atlikti po 2 tyrimus su 4 rutulių mašina, taip užtikrinant gautų rezultatų patikimumą. Prieš kiekvieną matavimą ar bandymą rutuliai buvo nuvalomi acetonu, siekiant pašalinti tepalų, dulkių ir kitų teršalų likučius nuo paviršiaus ir užtikrinti vienodas pradines sąlygas.

Pradinei paviršiaus būklei vizualiai įvertinti naudotas optinis mikroskopas Nikon Eclipse MA–100 su integruota skaitmenine kamera Nikon DS–Fi2. Kiekvienos serijos rutulių paviršius fotografuotas prieš tribologinius bandymus su dviem skirtingais didinimais: 50x, 100x. Mažesnis didinimas (50x) leido apžvelgti bendrą rutulio paviršiaus vaizdą ir stambius defektus, didesnis didinimas (100x) – įvertinti braižymų kryptingumą ir tankį. Po tribologinių bandymų tuo pačiu mikroskopu analizuoti nudilimo pėdsakai tiek apatiniuose nejudančiuose, tiek viršutiniame besisukančiame rutulyje. Nudilimo dėmės skersmuo išmatuotas naudojant mikroskopo programinę įrangą, kiekvienam bandytam rutuliui atlikus tris matavimus.

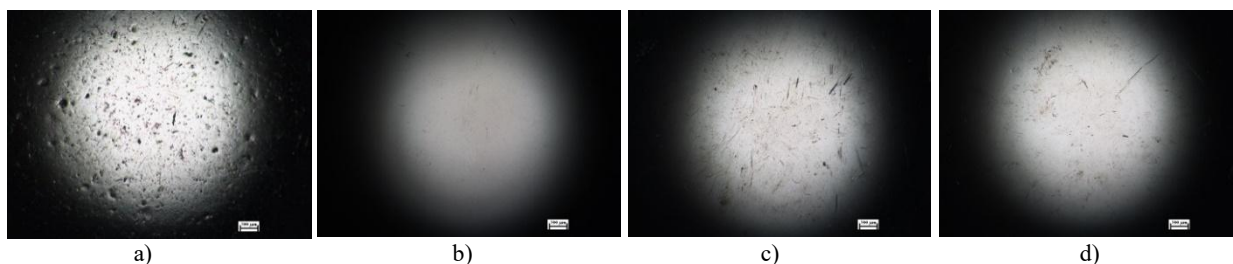
Rutulių mikrokietumas nustatytas Vikerso metodu. Naudotas laboratorinis kietumo matuoklis su deimantine piramidės formos adatėle, veikiantis pagal Vikerso kietumo matavimo metodą: adatėlė įspaudžiama į paviršių pasirinkta jėga, po to naudojantis mikroskopu išmatuojamos įspaudimo įstrižainės, iš kurių apskaičiuojamas kietumas. Indentavimo apkrova – 100 g. Kiekvienam rutuliui prieš matavimą paviršius papildomai nuvalytas acetonu, siekiant pašalinti teršalus, kurie galėtų iškraipyti rezultatus. Įspaudimo įstrižainės išmatuotos to paties prietaiso integruotu mikroskopu mikrometrais, po to kietumas apskaičiuotas pagal Vikerso kietumo formulę. Kiekvienai serijai atlikti 5 matavimai skirtingose rutulio paviršiaus vietose. Galutinė kiekvienai serijai priskiriama kietumo reikšmė yra penkių matavimų aritmetinis vidurkis.

Tepamoji medžiaga naudota sintetinė variklinė alyva SAE 5W–30. Alyva pilta į indą, kuriame yra 3 rutuliai tiek, kad visiškai apsemtų 3 nejudančius rutulius, taip užtikrinant stabilų tepimą viso bandymo metu. Bandymo apkrova 300 N, bandymo trukmė 60 min. Kiekvienos serijos rutuliai išbandyti po 2 pakartojimus. Bandymo metu buvo įrašomas sukimo momentas, iš kurio apskaičiuotas trinties koeficientas. Bandymai atlikti kambario temperatūroje (~20 °C), temperatūra specialiai nebuvo reguliuojama.

Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

Prieš tribologinius bandymus kiekvienos serijos rutuliai buvo ištirti optiniu mikroskopu esant 50x ir 100x kartų padidinimui (žr. 1 ir 2 pav.). Analizė atskleidė ryškius skirtingų serijų paviršiaus mikrostruktūros skirtumus.

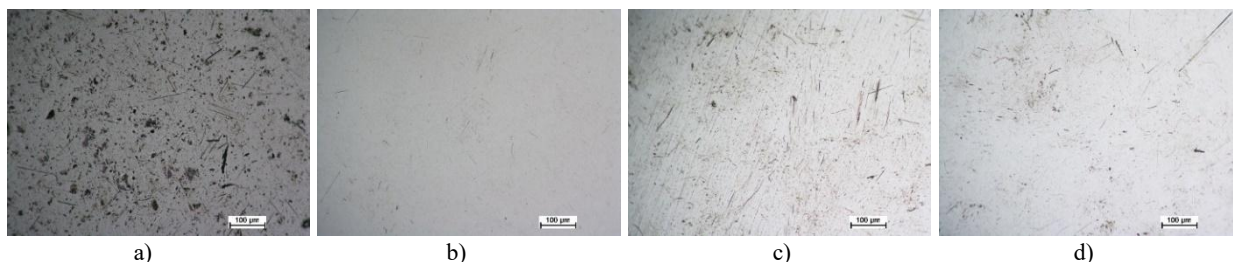
Padidinus 50 kartų (žr. 1 pav.) serijos skirtumas matomas jau iš pirmo žvilgsnio. 3S serijos paviršiuje pastebimi pasklidę smulkūs tamsūs taškiniai intarpai ir trumpos chaotiškos linijinės žymės. 5S serijos paviršius vizualiai yra švariausias artimas poliruotam, defektų beveik nematyti. 8S serija išsiskiria ryškiais kryptiniais braižymais. 22S serijos paviršius pasižymi smulkiais chaotiškais brūkšniais.



1 pav. Rutulių paviršiaus nuotraukos padidinus 50 kartų: a) 3S; b) 5S; c) 8S; d) 22S

Fig. 1. Images of the surface of the balls, magnified 50 times: a) 3S; b) 5S; c) 8S; d) 22S

Padidinus 100 kartų (žr. 2 pav.) skirtumai tarp rutulių paviršių dar labiau išryškėja. 3S serijos paviršiuje aiškiai matomos tamsios dėmės, kurios pasiskirsčiusios gana tolygiai. 5S serijos paviršius ir didesnio didinimo atveju išlieka lygiausias, matomos tik pavienės plonos žymės. 8S serijos paviršiuje atskleidžia, kad braižymai yra ne tik gilūs, bet ir susideda iš dviejų krypčių. 22S serijos paviršiuje pastebėti smulkūs padriki įbrėžimai su geriau matomu gilesniu įrėžimu.

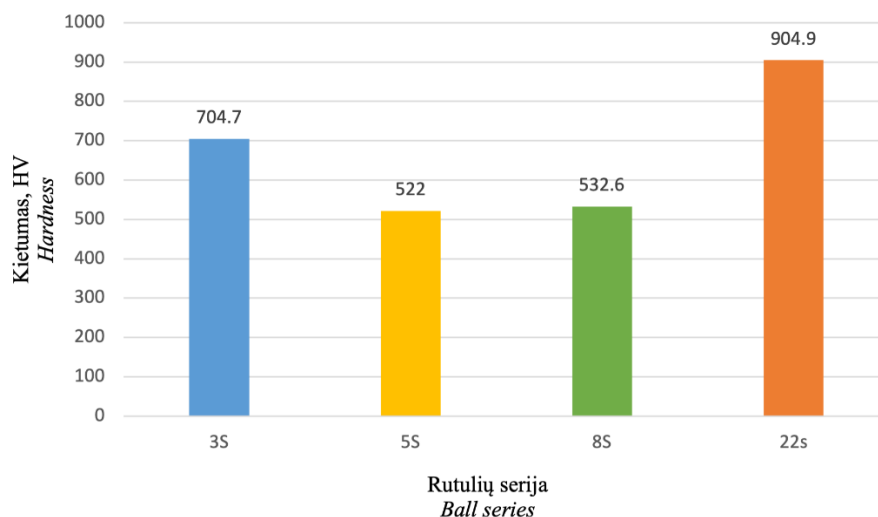


2 pav. Rutulių paviršiaus nuotraukos padidinus 100 kartų: a) 3S; b) 5S; c) 8S; d) 22S

Fig. 2. Images of the surface of the balls, magnified 100 times: a) 3S; b) 5S; c) 8S; d) 22S

Kiekvienos serijos rutulių mikrokietumas nustatytas atliekant penkis Vickerso mikrokietumo matavimo metodo bandymus skirtingose rutulio paviršiaus vietose. Kiekvieno bandymo metu išmatuotos 3 įdubimo įstrižainės ir apskaičiuotas jų vidurkis, o galutinis serijos kietumo įvertis gautas apskaičiuojant visų penkių bandymų rezultatų vidurkį.

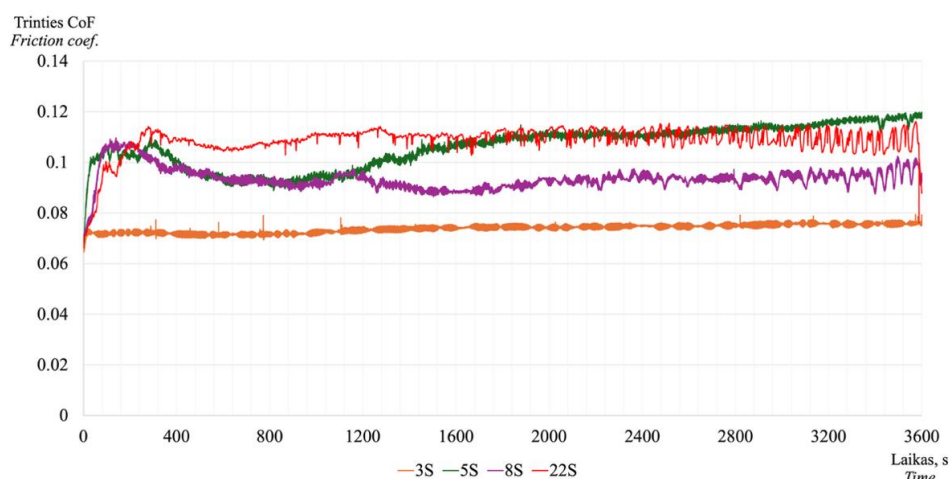
Didžiausiu kietumu pasižymi 22S serijos rutuliai – 905 HV, mažiausiu – 5S serija, kurios kietumas siekia 522 HV. Tarp šių dviejų serijų skirtumas yra beveik 383 HV, o tai yra labai reikšmingas skirtumas, galintis turėti tiesioginę įtaką dilimo atsparumui. 3S serija pagal kietumą užima 2 vietą – 847 HV, 1S serija – 3 su 652 HV, o 8S serija artima 5S – 533 HV (žr. 3 pav.).



3 pav. Skirtingų rutulių mikrokietumo matavimo rezultatai.

Fig. 3. Results of microhardness measurements.

Analizuojant skirtingų rutulių trinties koeficiento rezultatus (žr. 4 pav.) matyti, kad pradiniam etape (0–400 s) visų serijų trinties koeficientas sparčiai kinta. 5S, 8S ir 22S serijų trinties koeficientas yra kur kas aukštesnis apie 0,10–0,11 ir per pirmąsias 200–400 sekundžių svyruoja, kol pradeda nusistovėti dėl paviršių prisidirbimo. Išimtis yra 3S serija, abiejų bandymų metu trinties koeficiento reikšmės yra žemos (apie 0,071–0,072) ir beveik iš karto stabilizuojasi, rodydamos, kad šios serijos paviršiai reikalauja minimalaus prisitrynimo periodo.

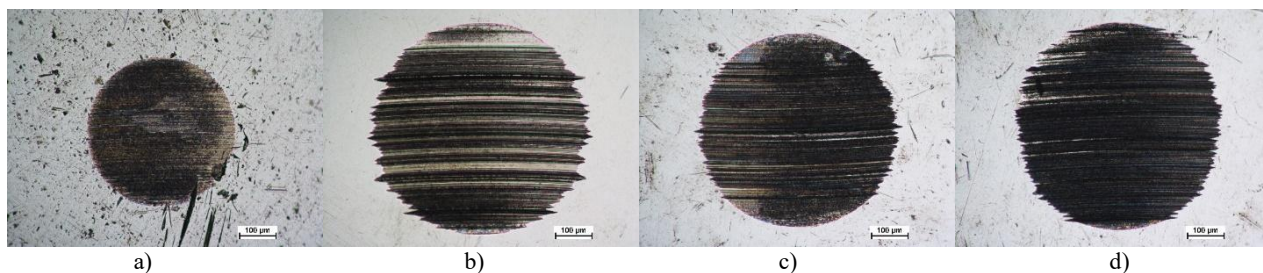


4 pav. Skirtingų rutulių serijų trinties koeficiento grafikai.

Fig. 4. Friction coefficient graphs for different ball series.

Atlikus trinties bandymus buvo padarytos nudilimo dėmių nuotraukos optiniu mikroskopu ir naudojant programinę įrangą buvo išmatuoti nudilimo dėmių dydžiai. 3S serijos nudilimo dėmė (žr. 5 pav. a) yra mažiausia iš visų – 375 μm skersmens. 3S serijos kontaktinėje zonoje efektyviai susiformavo tepalo plėvelė, kuri riboja tiesioginį metalo su metalu kontaktą. Mažą dėmės dydį lėmė aukštas šios serijos kietumas – 847 HV.

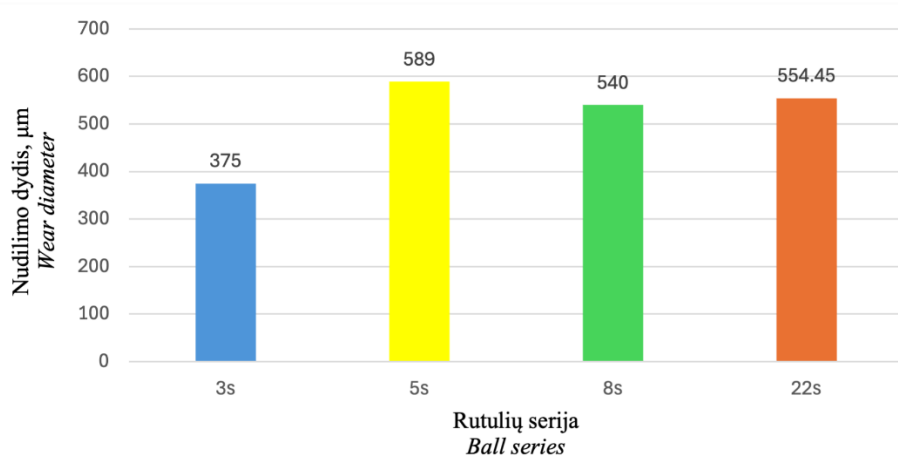
5S serijos nudilimo dėmė (žr. 5 pav. b) vizualiai išsiskiria labiausiai savo dydžiu – 590 μm ir padengta itin tankiomis, ryškiomis horizontaliomis rievėmis, tolygiai pasklidusiomis per visą dėmės plotą. Rievių reguliarumas ir tankis rodo intensyvų slydimo dilimą. Dėmės ribos taip pat ryškios, tačiau pats dėmės paviršius žymiai tamsesnis ir labiau nudilęs nei 3S. 5S serija prieš bandymą turėjo vizualiai lygiausią paviršių. Tai patvirtina, kad lygus paviršius nekompensoja žemo kietumo (522 HV). Minkštesnis paviršius greičiau deformuojasi kontaktinėje zonoje, todėl kontakto plotas plečiasi, dėmė didėja.



5 pav. Rutulių nudilimo dėmių nuotraukos: a) 3S; b) 5S; c) 8S; d) 22S

Fig. 5. Images of the wear marks in fixed balls: a) 3S; b) 5S; c) 8S; d) 22S

Nudilimo dėmės skersmuo yra vienas pagrindinių 4 rutulių trinties bandymo vertinimo kriterijų, parodantis kontaktinėje zonoje vykstančių deformacijos ir dilimo procesų intensyvumą. Kuo didesnis dėmės skersmuo, tuo didesnis kontaktinis plotas ir intensyvesnis medžiagos nusidėvėjimas. Išmatuoti guolių plieno rutulių nudilimo dėmių skersmenys ir apskaičiuotos kiekvienos serijos rutulių vidutinės reikšmės (žr. 6 pav.).



6 pav. Rutulių nudilimo dėmių dydžių grafikas.

Fig. 6. Graph showing the size of ball wear marks.

Mažiausiu trinties koeficientu pasižyminti 3S serija, tam įtakos turi aukštas kietumas (847 HV) ir ne visai lygus paviršius, kuris leidžia užsiklikti alyvai tarpeliuose, taip padedant išlaikyti alyvos plėvelę. Didžiausia trintis fiksuota 5S ir 22S serijoms rodo, kad nei lygus paviršius (5S), nei didžiausias kietumas (22S) atskirai negarantuoja mažiausios trinties.

Išvados

1. Mikroskopinė paviršiaus analizė atskleidė skirtingų gamybos serijų rutulių paviršiaus kokybės skirtumus: 5S serijos paviršius beveik neturėjo defektų, 3S serijos paviršiuje tolygiai pasklidusios duobelės ir smulkios chaotiškos žymės, 22S paviršiuje matoma šlifavimo tekstūra su pavieniais ryškesniais braižymais, o 8S serijos paviršius pasižymėjo ryškiausiais braižymais keliomis kryptimis.

2. Kietumo matavimai parodė, kad skirtingų serijų rutulių kietumas reikšmingai skiriasi – nuo 522 HV (5S) iki 905 HV (22S). 5S ir 8S serijų kietumo reikšmės yra labai artimos, nepaisant vizualiai skirtingos paviršiaus mikrogeometrijos, todėl šių serijų tribologinių savybių skirtumai sietini su paviršiaus geometrija.

3. Tribologinių bandymų rezultatai parodė, kad mažiausiu trinties koeficientu pasižymėjo 3S serija, kurios kietumas siekė 847 HV. 5S ir 22S serijų trinties koeficientas nusistovėjusiame trinties etape buvo aukščiausias apie 0,10–0,12 ir pasižymėjo didesniais svyravimais, rodančiais nestabilesnį tepimo režimą. Vizualiai lygiausias 5S serijos paviršius neužtikrino mažesnės trinties.

4. Nudilimo dėmių analizė parodė, kad mažiausia nudilimo dėmė (375 µm) susiformavo 3S serijos rutuliuose, o didžiausia (590 µm) 5s rutuliuose.

Literatūra

1. Morales-Espejel, G. E., Gabelli, A., & de Vries, A. J. C. (2015). A model for rolling bearing life with surface and subsurface survival — tribological effects. *Tribology Transactions*, 58, 894–906. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10402004.2015.1025932>
2. He, T., Zhang, Y., Wang, L., & Liu, Z. (2025). The impact of surface roughness on the friction and wear performance of GCr15 bearing steel. *Lubricants*, 13(4), 187. <https://www.mdpi.com/2075-4442/13/4/187>

3. Yuan, Z., Chen, H., Li, J., Cao, B., & Zhang, D. (2024). Effect of surface roughness on friction and wear behavior of GCr15 bearing steel. *Surface Science and Technology*, 2, 28. <https://link.springer.com/article/10.1007/s44251-024-00057-2>
4. Li, Y., Wang, X., Zhou, H., & Zhang, K. (2024). Wear behavior and damage characterization for AISI 52100 bearing steels: effect of hardness and spherical carbides. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 8359–8370. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785424010366?via%3Dihub>
5. Zhang, M., Liu, Y., Chen, S., & Wu, J. (2024). Influence of laminar plasma surface quenching on the tribological properties of AISI 52100 bearing steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 33, 7999–8014. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-023-08542-9>

STUDY OF THE INFLUENCE OF SURFACE IRREGULARITIES OF STEEL BALLS ON LUBRICATION

Abstract

The surface quality of bearing steel balls is one of the factors that can have a significant impact on friction and wear processes in the friction pairs of lubricated mechanical systems. Bearing steel balls from different production series often have uneven surface microgeometry, ranging from smooth and polished to rough, scratched, or having other defects. The influence of these differences on tribological behavior remains insufficiently studied. This work presents a comparative tribological analysis of steel balls from four different production series. The initial surface condition was assessed using an optical microscope, and the hardness of the material was determined using the Vickers method. Tribological tests were performed on a four-ball machine in accordance with DIN 51350 using SAE 5W-30 engine oil. During the test, the torque and coefficient of friction were recorded, and after the tests, the sizes of the wear spots were measured. The results of the study revealed a relationship between material hardness, initial surface quality, and tribological characteristics: the higher hardness series had a lower coefficient of friction and smaller wear spots. The series with the visually smoothest surface showed the highest wear due to lower hardness, indicating that hardness is a more important factor for durability than surface appearance. The conclusions can be useful for engineers making decisions about bearing selection and quality assessment.

Keywords: bearing steel, surface roughness, tribological testing, coefficient of friction, microhardness.