

STABDŽIŲ TRINKELIŲ EKSPLOATACINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAS

Vytautas KRYŽIUS, *Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: vytautas.kryzius@stud.vdu.lt*

Arvydas PAULIUKAS, *Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: arvydas.pauliukas@vdu.lt*

Santrauka

Straipsnyje pateikiamas stabdžių trinkelėlių eksploatacinių savybių tyrimas. Bandymo metu tiriamos šešių skirtingų gamintojų stabdžių trinkelės, kurios tinka tai pačiai transporto priemonėi. Bandymai atliekami su stabdžių trinkelėlių bandymo stendu „GARLING“ išlaikant tas pačias bandymo sąlygas visoms tiriamoms stabdžių trinkelėms. Tyrimo metu fiksuojami stabdžių trinkelėlių trinties koeficiento μ_{op} , μ_{min} , μ_{max} reikšmės, dilumo koeficientas, trinties koeficiento μ_{vid} , kitimas ciklo metu, trinties koeficiento priklausomybė nuo temperatūros.

Įprastomis važiavimo sąlygomis stabdžių diskų ir trinkelėlių temperatūra gali svyruoti nuo 100 °C iki 300 °C. Stipriai ar ilgai stabdant, temperatūra gali pakilti ir virš 400 °C. Tyrimo metu stabdžių trinkelės T3 pasiekė 820,68 °C temperatūrą ir išlaikė stabilų trinties koeficientą μ_{vid} 0,438. Didėjant stabdžių trinkelėlių T1 temperatūrai iki 857,80 °C, trinties koeficientas μ_{vid} didėjo 0,4–0,599. Stabdžių trinkelėlių T2 pasiekta maksimali 573,3 °C temperatūra ir mažėjantis trinties koeficientas μ_{vid} kito 0,475–0,275 ribose. Stabdymo metu stabdžių trinkelės T4 pasiekė žemą 510,97 °C temperatūrą, turėjo mažėjantį trinties koeficientą μ_{vid} 0,413–0,250. Kaip matyti, didėjant temperatūrai šios trinkelės neišlaikė pastovios trinties koeficiento reikšmės, tai rodo blogesnes eksploatacines savybes. Tyrimo rezultatai parodė, kad rinkoje esančių stabdžių trinkelėlių kokybė ir charakteristikos gali būti labai įvairios. Žemas trinties koeficientas, gali turėti reikšmingą įtaką stabdymo efektyvumui, saugumui avarinio stabdymo metu ir kelionės komfortui.

Reikšminiai žodžiai: stabdžių trinkelės, trinties koeficientas, stabdžiai.

Įvadas

Stabdžių sistema skirta važiuojančių mašinų greičiui sumažinti arba visiškai jas sustabdyti bei laikyti stovinčias. Stabdžių trinkelėlių eksploatacinių savybių tyrimas yra labai svarbus automobilių saugos ir eksploatacinių savybių kontekste (Andreea ir kt., 2023). Stabdžių trinkelės yra labai svarbi transporto priemonės stabdžių sistemos sudedamoji dalis, kuri yra atsakinga už transporto priemonės lėtėjimą, kai kinetinė energija paverčiama šilumine energija (Alveset ir kt., 2021). Stabdžių trinkelėlių kokybė ir eksploatacines savybes daro tiesioginę įtaką transporto priemonių saugai (Sunilet ir kt., 2023).

Vystantis automobilių technologijoms, didėja poreikis įvertinti stabdžių trinkelėlių eksploatacines savybes. Tai apima tokius veiksnius kaip stabdymo efektyvumas, nusidėvėjimo charakteristikos, triukšmo lygis, terminis stabilumas (Irawanet ir kt., 2022). Stabdžių trinkelėlių eksploatacinių savybių tyrimas yra aktualus ne tik iš tradicinės automobilių inžinerijos perspektyvos, bet ir atspindi šiuolaikinius rūpesčius, susijusius su tvarumu (Wahlsromet ir kt., 2020). Įvairių rinkoje esančių stabdžių trinkelėlių kokybės skirtumai kelia didelių problemų tiek vartotojams, tiek automobilių pramonės profesionalams (Kennethaset ir kt., 2024). Nors kai kurios stabdžių trinkelės pasižymi dideliu našumu ir ilgaamžiškumu, kitos gali neatitikti kokybės standartų ir stabdymo veiksmingumo, dėl ko gali kilti pavojus eismo saugumui (Bhakuniet ir kt., 2023).

Skirtingo gamintojo stabdžių trinkelės susideda iš įvairių trinties medžiagų. Remiantis jų funkcionalumu, šios neapdorotos trinties medžiagos gali būti suskirstytos į keturias kategorijas: trinties modifikatoriai, stiprikliai, užpildai ir rišamosios medžiagos (Bhakuniet ir kt., 2023). Šiuo tyrimu siekiama palyginti skirtingų gamintojų stabdžių trinkelės, vertinant jų teigiamas ir neigiamas savybes. Išsamiai analizuojant šiuos aspektus, siekiama suteikti vertingų įžvalgų vartotojams ir pramonės specialistams apie rinkoje esančių stabdžių trinkelėlių kokybę ir ilgaamžiškumą. Ši išsami analizė padeda priimti pagrįstus sprendimus renkantis tinkamas stabdžių trinkelės konkrečioms transporto priemonėms ir važiavimo sąlygoms. Analizuodami šių tyrimų rezultatus galima nustatyti numatomą stabdžių trinkelėlių tarnavimo laiką ir palyginti skirtingų markių ar tipų veiksmingumą.

Tyrimo tikslas – įvertinti skirtingų gamintojų stabdžių trinkelėlių eksploatacines savybes.

Išsikeltam tikslui pasiekti sprendžiami šie **uždaviniai**:

1. Sudaryti stabdžių trinkelėlių tyrimo metodiką.
2. Atlikti skirtingų gamintojų stabdžių trinkelėlių bandymus.
3. Įvertinti tirtų stabdžių trinkelėlių eksploatacines savybes.

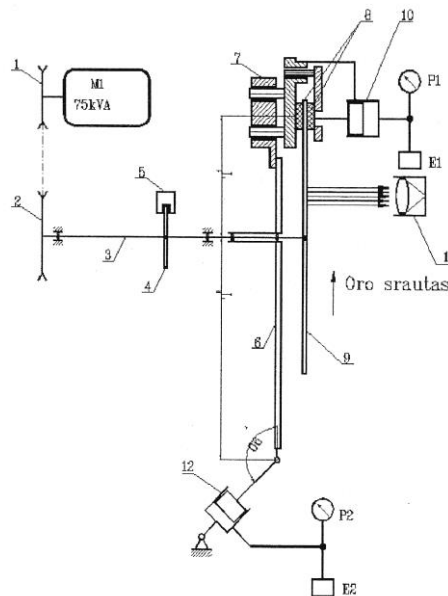
Tyrimų objektas ir metodai

Eksperimentiniai tyrimai atlikti UAB „Neigiamas pagreitis“ įmonėje, atliekančioje transporto priemonių saugumo bandymus. Stabdžių trinkelės išbandomos naudojant stabdžių trinkelėlių bandymo įrangą „GARLING“, kurios konstrukcija leidžia atkartoti stabdžių sistemos funkcijas. Stabdžių trinkelėlių bandymų stendas yra skirtas automobilių stabdžių trinkelėlių trinties koeficiento, dilumo ir frikcinės medžiagos specifinio svorio (tankio) matavimams. Tyrime naudojamos šešių skirtingo gamintojo stabdžių trinkelės, kurių sudėtyje yra įvairių trinties medžiagų.

Atliekant tyrimą stabdžių disko sukimosi dažnis be apkrovos buvo 650 ± 10 aps/min. Stabdžių trinkelės prispaudimo jėga prie stabdžių disko – $100 \text{ N/cm}^2 \pm 5 \%$, tam pasiekti naudojamas bendras hidraulinis slėgis sistemoje – $20 \text{ bar} \pm 3 \%$. Kiekvienas ciklas pradedamas, kai stabdžių trinkelėlių temperatūra yra $100 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Bandymo įrangos kompiuteris registruoja trinties koeficiento reikšmes (μ_{op} , μ_{min} , μ_{max}), temperatūros pokyčius ir atliktą trinties darbą, stabdžių trinkelės sveriamos prieš ir po bandymo, fiksuojamas svoris ore ir vandenyje. Trinties savybes atspindinčios trinties koeficiento reikšmės, gautos bandymų metu, lyginamos su originalaus gamintojo reikšmėmis.

Atliekant bandymą turi būti išlaikytos atitinkamos darbo sąlygos:

- aplinkos oro temperatūra nuo 5 iki $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (nuo 278 iki 313 K);
- santykinė oro drėgmė prie $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (298 K) iki 50% ;
- atmosferinis slėgis nuo 86 iki 106 kPa (867 iki 1067 mbar .);
- maitinančio elektros tinklo įtampa nuo 198 iki 245 V , ($50 \pm 0,5$) Hz dažnio su harmonikų lygiu neviršijančiu 5% .



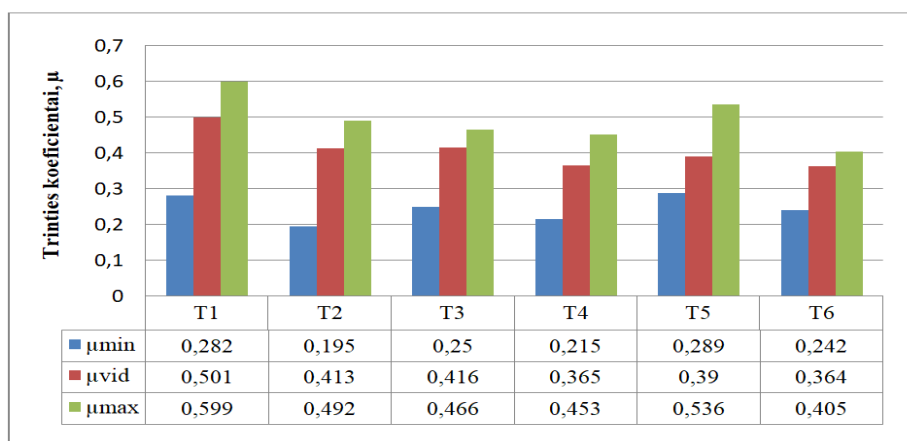
1 pav. Stabdžių trinkelėlių bandymo stendo schema. 1 – varantysis skriemulys, 2 – varomasis skriemulys, 3 – velenas, 4 – diskas su įpjovomis apsisukimams matuoti, 5 – optoelektroninis jutiklis, 6 – stabdžių apkabos laikiklis, 7 – originali stabdžių apkaba, 8 – stabdžių trinkelės, 9 – originalus stabdžių diskas, 10 – stabdžių apkabos hidrocilindras, 11 – bekontaktis (su IR spinduliais) disko paviršiaus temperatūros matuoklis, 12 – trinties jėgos atsveriamasis hidrocilindras

Fig. 1. Diagram of the test bench for brake pads. 1 – drive pulley, 2 – drive pulley, 3 – shaft, 4 – disc with notches for measuring revolutions, 5 – optoelectronic sensor, 6 – brake caliper holder, 7 – original brake caliper, 8 – brake pads, 9 – original brake disc, 10 – brake caliper hydraulic cylinder, 11 – contactless (with IR rays) disc surface temperature meter, 12 – friction force counterbalance hydraulic cylinder

Bandymas buvo atliekamas pagal JT EEK R90 norminio dokumento reikalavimus ((JT/EEK) taisyklė Nr. 90, 2009). Tyrimo metu sukaupti bandymų rezultatai buvo apdorojami ir analizuojami. Analizuota kiekviena stabdžių trinkelėlių pora ir įvertintos jų savybės. Stabdžių trinkelės buvo lyginamos tarpusavyje, norint išsiaiškinti geriausias savybes turinčias stabdžių trinkelės. Tyrimo rezultatai leido iš arčiau susipažinti su rinkoje esančių stabdžių trinkelėlių kokybe ir jų skirtumais.

Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

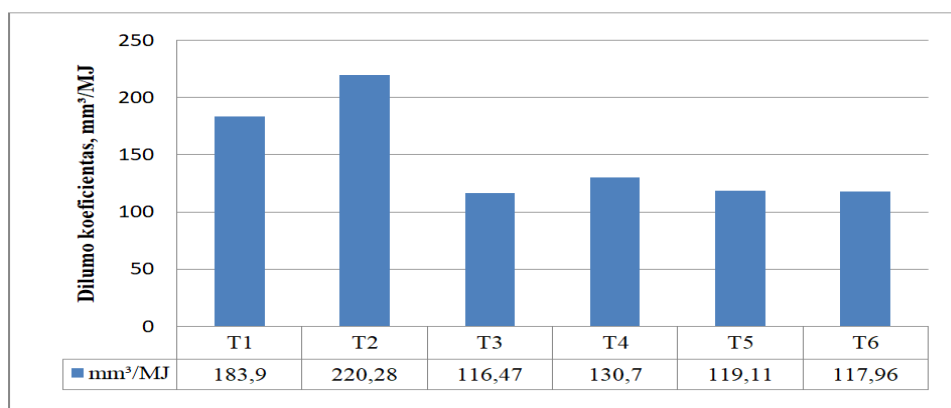
Tyrimo metu užfiksuotos stabdžių trinkelėlių trinties koeficiento reikšmės pateiktos stulpelinėje diagramoje 2 pav. Analizuojant tyrimo metu gautus μ_{min} , μ_{max} trinties koeficientų rezultatus, daromos išvados, kad didžiausias trinties koeficientas μ_{max} buvo gautas T1 stabdžių trinkelėlių $\mu_{max} = 0,599$, tuo tarpu mažiausias T6 stabdžių trinkelėlių $\mu_{max} = 0,405$. Kaip matyti, likusių stabdžių trinkelėlių rezultatai μ_{max} svyravo atitinkamai $0,453$ – $0,536$ ribose. Tai vienas iš svarbesnių trinties koeficiento rodiklių μ_{min} , kuris parodo mažiausią viso tyrimo metu užfiksuotą trinties koeficientą. Geriausi rezultatai – T5 stabdžių trinkelėlių $\mu_{min} = 0,289$, o prasčiausi – T2 stabdžių trinkelėlių $\mu_{min} = 0,195$. Likusių stabdžių trinkelėlių T1, T3, T4 ir T6 μ_{min} reikšmės pasiskirstė atitinkamai $0,215$ – $0,282$ ribose.



2 pav. Tiriamų stabdžių trinkelėlių trinties koeficiento μ_{vid} , μ_{min} , μ_{max} reikšmės.

Fig. 2. Friction coefficient μ_{vid} , μ_{min} , μ_{max} values of tested brake pads.

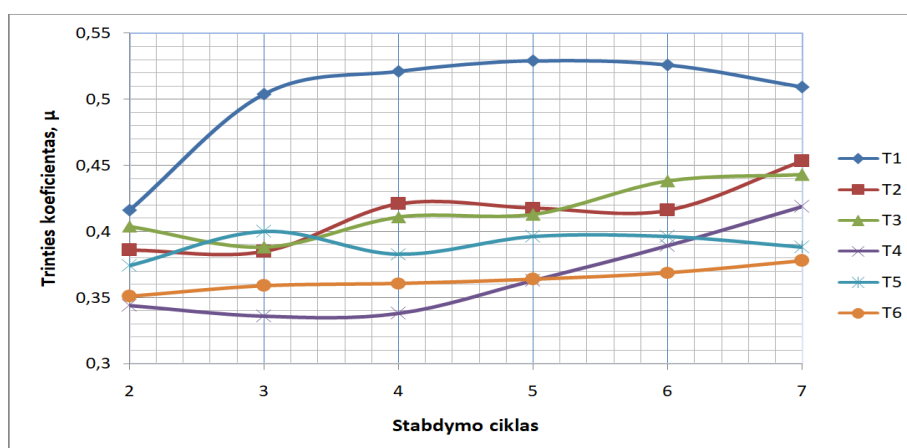
Stabdžių trinkelėlių dilumo koeficientai pateikti 3 pav. Iš gautų rezultatų daroma išvada, kad labiausiai dilios stabdžių trinkelės T2, jų dilumo koeficientas $220,28 \text{ mm}^3/\text{MJ}$. Antroje vietoje yra T1 stabdžių trinkelės, kurių dilumo koeficientas $183,9 \text{ mm}^3/\text{MJ}$, o mažiausiai dilios T3 stabdžių trinkelės – $116,47 \text{ mm}^3/\text{MJ}$. Likusių T4, T5 ir T6 stabdžių trinkelėlių rezultatai atitinkamai svyravo $117,96\text{--}130,7 \text{ mm}^3/\text{MJ}$ ribose.



3 pav. Tiriamų stabdžių trinkelėlių dilumo koeficiento reikšmės, mm^3/MJ

Fig. 3. The wear coefficient values of the tested brake pads, mm^3/MJ

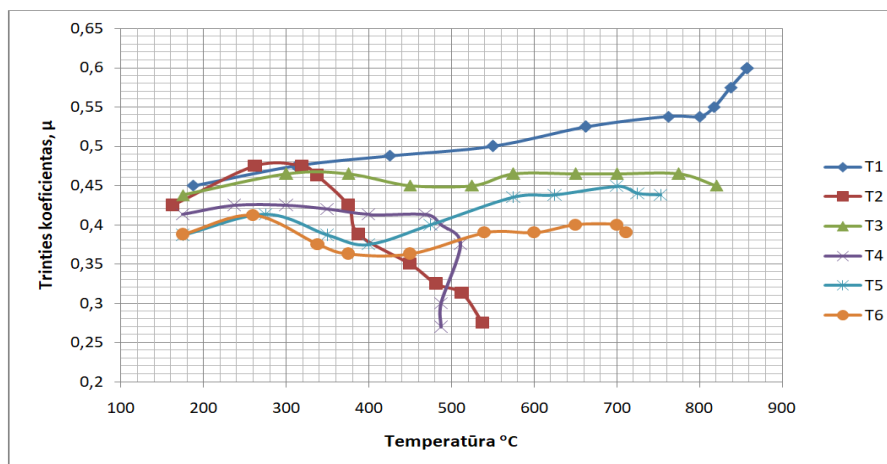
Stabdžių trinkelėlių, trinties koeficiento μ_{vid} kitimo grafikas pateiktas 4 pav. Remiantis gautais tyrimo rezultatais daroma išvada, kad didžiausia μ_{vid} yra T1 stabdžių trinkelėlių $0,416\text{--}0,526$. Geriausi μ_{vid} rezultatai buvo trinkelės T3 ($\mu_{vid} = 0,404 - 0,443$) ir T2 ($\mu_{vid} = 0,386 - 0,453$). Mažiausios μ_{vid} reikšmės užfiksuotos T5 trinkelėlių ($\mu_{vid} = 0,344\text{--}0,419$) ir stabdžių trinkelėlių T6 ($\mu_{vid} = 0,351 - 0,378$). Iš pateikto grafiko matyti, kaip 7 cikle įjungtas priverstinis stabdžių sistemos aušinimas paveikė tyrimo rezultatus. Įsijungus priverstiniam aušinimui T1, T3 ir T5 stabdžių trinkelėlių μ_{vid} reikšmės sumažėjo, o T2, T4 ir T6 μ_{vid} reikšmės padidėjo, tai parodė skirtingas stabdžių trinkelėlių trinties koeficiento μ_{vid} priklausomybes nuo temperatūros.



4 pav. Tiriamų stabdžių trinkelėlių trinties koeficiento μ_{vid} kitimas ciklo metu

Fig. 4. Variation of the friction coefficient μ_{vid} of the tested brake pads during the cycle

Tiriamų stabdžių trinkelė trinties koeficiento kitimo priklausomybė nuo temperatūros pateikta 5 pav. Pateiktame grafike matyti, kad bandant T1 stabdžių trinkeles buvo pasiekta aukščiausia 857,8 °C temperatūra ir gautas didžiausias trinties koeficientas $\mu_{vid} = 0,526$. T3 stabdžių trinkelė atveju pasiekta maksimali 820,68 °C temperatūra ir trinties koeficientas $\mu_{vid} = 0,438$. Bandant T5 stabdžių trinkeles, pasiekta maksimali temperatūra 753,26 °C ir vidutinis trinties koeficientas $\mu_{vid} = 0,396$. Darytina išvada, kad šios trys stabdžių trinkelės pasižymi geromis savybėmis, kai išlaikomas stabilus arba didėjantis trinties koeficientas didėjant temperatūrai.



5 pav. Tiriamų stabdžių trinkelė trinties koeficiento priklausomybė nuo temperatūros

Fig. 5. Temperature dependence of the friction coefficient of the tested brake pads

T2 stabdžių trinkelė pasiekta maksimali 537,35 °C temperatūra buvo viena žemiausių, nors vidutinis trinties koeficientas μ_{vid} buvo gautas 0,416, tačiau stabdymo metu pasiekus 318,8 °C temperatūrą, trinties koeficientas pradeda mažėti ir pasiekus maksimalią 537,35 °C temperatūrą trinties koeficientas sumažėja iki 0,275 ribos. Panaši situacija buvo gauta ir su T4 stabdžių trinkelė atveju. Kaip matyti, pasiekus maksimalią 510,97 °C temperatūrą, vidutinis trinties koeficientas μ_{vid} buvo gautas 0,389. Tuo tarpu stabdymo metu pasiekus 468,75 °C temperatūrą, trinties koeficientas pradeda mažėti ir pasiekus maksimalią 510,97 °C temperatūrą, trinties koeficientas sumažėja iki 0,270 reikšmės. Šių dviejų stabdžių trinkelė bandinių tyrimo rezultatai kelia susirūpinimą dėl tolimesnių eksploatacinių savybių.

Išvados

1. Stabdžių trinkelės, pasižyminčios geromis eksploatacinėmis savybėmis, didėjant temperatūrai išlaiko stabilų ir didėjantį trinties koeficientą, tai parodo jų geras eksploatacines savybes.
2. Geromis eksploatacinėmis charakteristikomis pasižymėjo bandinio T1 stabdžių trinkelės, kurių trinties koeficiento μ_{vid} μ_{max} reikšmės svyravo 0,501 ir 0,599 ribose.
3. Prasčiausiomis eksploatacinėmis charakteristikomis pasižymėjo bandinio T2 stabdžių trinkelės, kurių trinties koeficiento μ_{vid} μ_{min} reikšmės svyravo 0,413 ir 0,195 ribose.
4. Pastebėtas bandinių T2 ir T4 stabdžių trinkelė trinties koeficiento sumažėjimas didėjant temperatūrai, keliantis susirūpinimą dėl jų patikimumo sudėtingose situacijose.

Literatūra

1. Alves, C., Evtyugina, M., Vicente, A., Conca, E., Amato, F. 2021. Organic profiles of brake wear particles, *Atmospheric research*, Vol. 255, 105557.
2. Ilie, F., Cristescu, A. C. 2023. Experimental Study of the Correlation between the Wear and the Braking System Efficiency of a Vehicle. *Applied Sciences*, Vol. 13(14), 8139. <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/14/8139>
3. Bhakuni, H., Muley, A. V. 2023. Fabrication, testing & analysis of particulate ceramic matrix composite for automotive brake pad application. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.413>
4. Hemanth, M. S. K., Dhas, J. E. R. 2023. Eco-friendly materials for brake pad-ANSYS overview. *Materials Today: Proceedings*.
5. Irawan, A. P., Fitriyana D. F., Tezara, C., Siregar, J. P., Laksmidewi, D., Abdullah, G. D. B. M. Z., Junid, R., Hadi, A. E., Hazim, M., Najid, M. H. 2022. Overview of the Important Factors Influencing the Performance of Eco-Friendly Brake Pads. *Polymers*, Vol. 14(6), 1180.
6. Jungtinių Tautų Europos ekonomikos komisijos (JT/EEK) taisyklė Nr. 90 – „Suvienodintos variklinių transporto priemonių ir jų priekabų atsarginių stabdžių kaladėlių sąrankų ir būgninių stabdžių kaladėlių nuostatos“ (2009) [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX%3A42010X0528%2802%29> (žiūrėta 2023 09 06).

7. Jensen, K. M., Santos, I. F., Corstens H. J. P. 2024. Estimation of brake pad wear and remaining usefullife from fused sensor system, statistical data processing, and passenger carlongitudinal Dynamics. *Wear*, Vol. 538, 205220.
8. Wahlsrom, J., Leonardi, M., Tu, M., Lyu, Y., Perricone, G., Olofsson, S. G. U. O. 2020. A Study of the Effect of Brake Pad Scorchingon Tribology and Airborne Particle Emissions. *Atmosphere*, Vol. 11(5), 488.

RESEARCH OF BRAKE PADS PERFORMANCE CHARACTERISTIC

Summary

The article presents a study of the operational properties of brake pads. During the test, brake pads from six different manufacturers are examined, which are suitable for the same vehicle. The tests shall be carried out on the GARLING brake pad test bench under the same test conditions for all the brake pads under examination. During the study, the values of the friction coefficient μ_{op} , μ_{min} , μ_{max} of the brake pads, the variation of the friction coefficient during the cycle μ_{vid} , the dependence of the friction coefficient on temperature and the coefficient of wear are recorded.

Under normal driving conditions, the temperature of the brake discs and pads can vary from 100 °C to 300 °C. With strong or prolonged braking, the temperature may also rise above 400 °C. During the study, the brake pads of the sample T3 reached a temperature of 820.68 °C and maintained a stable friction coefficient of μ_{vid} 0.438. As the temperature of the brake pads of the sample T1 increased to 857.80 °C, the friction coefficient μ increased from 0.4 to 0.599, respectively. Brake pads T2 achieved a maximum temperature of 573.3 °C and a decreasing friction coefficient μ varied from 0.475 to 0.275. During braking, the brake pads of the sample T4 reached a low temperature of 510.97 °C had a decreasing friction coefficient μ from 0.413 to 0.250. As can be seen, with increasing temperature, these pads did not retain a constant value of the friction coefficient, which indicates worse performance. The results of the study confirm that the quality and characteristics of the brake pads on the market can have a significant impact on braking efficiency, safety during emergency braking and travel comfort. These factors can be decisive for the driver to ensure optimal handling of the car and braking performance in various situations, including emergency brakes.

Keywords: brake pads, coefficient of friction, brakes.