

REVITALIZANTAIS MODIFIKUOTOS VARIKLINĖS ALYVOS TEPAMŲJŲ SAVYBIŲ VERTINIMAS

Donatas MARTIŠIUS, Vytauto didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: donatas.martisius@vdu.lt

Santrauka

Straipsnyje nagrinėjamas sintetinių 5W-30 klamos klasės variklinių alyvų, modifikuotų revitalizantu, tepamųjų savybių vertinimas ribinio tepimo sąlygomis. Tyrimo tikslas – nustatyti revitalizanto įtaką trinties ir dilimo rodikliams bei įvertinti apkrovos poveikį tribologiniams parametrams. Eksperimentiniai tyrimai atlikti keturių rutulių metodu pagal DIN 51 350 standartą, taikant 150 N ir 300 N apkrovas. Bandymo metu registruotas trinties momentas ir temperatūra, apskaičiuotas trinties koeficientas, o po bandymų išmatuoti dilimo pėdsakų skersmenys. Duomenys apdoroti statistiškai, apskaičiuojant aritmetinius vidurkius, standartinius nuokrypius ir 95 % pasikliautinius intervalus. Nustatyta, kad didėjant apkrovai intensyvėja trinties procesai ir šilumos generacija, o sistemos reakcija tampa jautresnė priedų poveikiui. Revitalizanto efektyvumas priklausė nuo bazinės alyvos sudėties: vienos alyvos atveju reikšmingų pokyčių nenustatyta, tuo tarpu kitos alyvos sistemoje esant 300 N apkrovai stebėtas trinties momento ir dilimo sumažėjimas. Rezultatai rodo, kad revitalizanto poveikis nėra universalus ir labiau pasireiškia esant didesnėms kontaktinėms apkrovoms, kai suaktyvėja tribocheminiai procesai ir galimas apsauginės triboplėvelės formavimasis.

Reikšminiai žodžiai: tribologija, sintetinė variklinė alyva, revitalizantas, ribinis tepimas, trinties koeficientas, trinties momentas, dilimas, triboplėvelė.

Įvadas

Vidaus degimo variklių eksploatacinis patikimumas ir ilgaamžiškumas tiesiogiai priklauso nuo tepimo sistemos efektyvumo bei variklinės alyvos tribologinių savybių. Alyva mažina trintį ir paviršių dilimą, apsaugo metalinius paviršius nuo korozijos, todėl jos savybių stabilumas turi esminę reikšmę mechaninių sistemų darbo patikimumui (Mang, Dresel, 2017; Totten, 2014). Eksploatacijos metu dėl aukštos temperatūros, kontaktinių apkrovų ir oksidacinių procesų alyvos savybės palaipsniui blogėja – gali didėti trinties koeficientas ir dilimo intensyvumas (Bhushan, 2013). Dėl šios priežasties tribologijoje nuolat ieškoma sprendimų, leidžiančių pagerinti alyvų tepamąsias savybes ir sumažinti dilimą.

Pastaraisiais metais rinkoje plačiai siūlomi papildomi alyvos priedai – revitalizantai, kuriems priskiriamas gebėjimas aktyvuoti trinties zonoje ir formuoti apsauginius sluoksnius ant metalinių paviršių. Literatūroje jų veikimas siejamas su tribocheminėmis reakcijomis ir apsauginių triboplėvelių formavimusi ribinio tepimo sąlygomis (Spikes, 2004; Fujita, Spikes, 2004). Tokios plėvelės sumažina tiesioginį metalų kontaktą ir gali stabilizuoti trinties procesą. Vis dėlto, paviršiaus regeneracijos efektas nėra vienareikšmiškai patvirtintas. R. Smigins ir kt. (2025) nustatė, kad nors tam tikras trinties sumažėjimas gali būti stebimas, aiškių revitalizatoriaus sukeltos paviršiaus regeneracijos požymių nenustatyta, o vyraujantis dilimo mechanizmas išlieka adhezinis.

Ribinio tepimo sąlygomis svarbus vaidmuo tenka prisidirbimo (*running-in*) procesui, kurio metu kinta realus kontaktinis plotas ir paviršių mikroreljefas (Biswas et al., 2021). Šis procesas turi tiesioginę įtaką trinties stabilizacijai ir tolesniam paviršių dilimui.

Remiantis literatūros analize, galima teigti, kad revitalizantų efektyvumas nėra universalus ir priklauso nuo bazinės alyvos sudėties, priedų suderinamumo ir apkrovos režimo. Todėl būtini sistemingi laboratoriniai tyrimai, leidžiantys objektyviai įvertinti šių priedų įtaką skirtingomis darbo sąlygomis.

Šiame darbe keliama hipotezė, kad sintetinių variklinių alyvų modifikavimas revitalizantu gali sumažinti trinties ir dilimo intensyvumą, tačiau poveikio mastas priklauso nuo apkrovos dydžio ir bazinės alyvos sudėties. Šiai prielaidai patikrinti atlikti eksperimentiniai tribologiniai tyrimai, leidžiantys įvertinti modifikuotų alyvų tepamųjų savybių pokyčius.

Tyrimo tikslas – ištirti revitalizanto įtaką sintetinių variklinių alyvų tepumui.

Iškeltam tikslui pasiekti sprendžiami šie **uždaviniai**:

1. Įvertinti tribologines savybes naudojant alyvą be revitalizanto, alyvą su revitalizantu ir alyvą su padidintu revitalizanto koncentracijos kiekiu bei palyginti jų rodiklius tarpusavyje.
2. Nustatyti apkrovos įtaką trinties koeficientui, trinties momentui, temperatūrai ir dilimui.
3. Įvertinti dilusių paviršių morfologinius pokyčius ir jų sąsajas su tribologiniais parametrais.
4. Įvertinti revitalizanto efektyvumą gerinant sintetinių variklinių alyvų tribologines savybes, apibendrinant eksperimentinius rezultatus.

Tyrimų objektas ir metodai

Tyrimo objektas – sintetinių 5W-30 klamos klasės variklinių alyvų tepamosios savybės ir jų pokytis, modifikavus alyvas revitalizantu. Tirtos dvi komercinės sintetinės variklinės alyvos (toliau – Alyva I ir Alyva II) bei viena gamykliškai modifikuota alyva su padidintu revitalizanto kiekiu (REV-etalonas). Laboratorinėje aplinkoje buvo parengti penki

bandiniai: Alyva I, Alyva I + REV, Alyva II, Alyva II + REV ir REV-etalonas. Tyrime naudotas revitalizantas – tribologinis priedas, skirtas alyvos tepamosioms savybėms gerinti (toliau – REV). Jo veikimas siejamas su procesais trinties porose, kurių metu ant metalinių paviršių gali formuotis apsauginis tribokeraminis sluoksnis, galintis sumažinti paviršių šiurkštumą, mažinti dilimo intensyvumą ir pagerinti tepimo sąlygas. Į bandinius Alyva I + REV ir Alyva II + REV revitalizantas laboratorinėmis sąlygomis buvo įmaišytas pagal gamintojo rekomenduojamą koncentraciją. REV-etalonas – sintetinė 5W-30 klamos klasės variklinė alyva, kurioje revitalizantas integruotas gamybinėmis sąlygomis ir pasižymi padidintu jo kiekiu.

Tepamųjų savybių vertinimas atliktas keturių rutulių metodu pagal DIN 51 350 standartą, kuris plačiai taikomas alyvų antitrintinėms ir antidiliminėms savybėms nustatyti. Bandymo metu trys rutuliukai buvo įtvirtinti laikiklyje ir panardinti tiriamoje alyvoje, o ketvirtasis rutuliukas buvo prispaudžiamas iš viršaus ir sukamas pastoviu greičiu. Bandymų metu taikytos dvi apkrovos – 150 N ir 300 N, bandymo trukmė – 3600 s. Nominalus trinties spindulys $r = 0,00375$ m, kontaktų skaičius $n = 3$, koeficientas $k = 0,408$. Pradinė bandymo temperatūra T_0 buvo 20–25 °C.

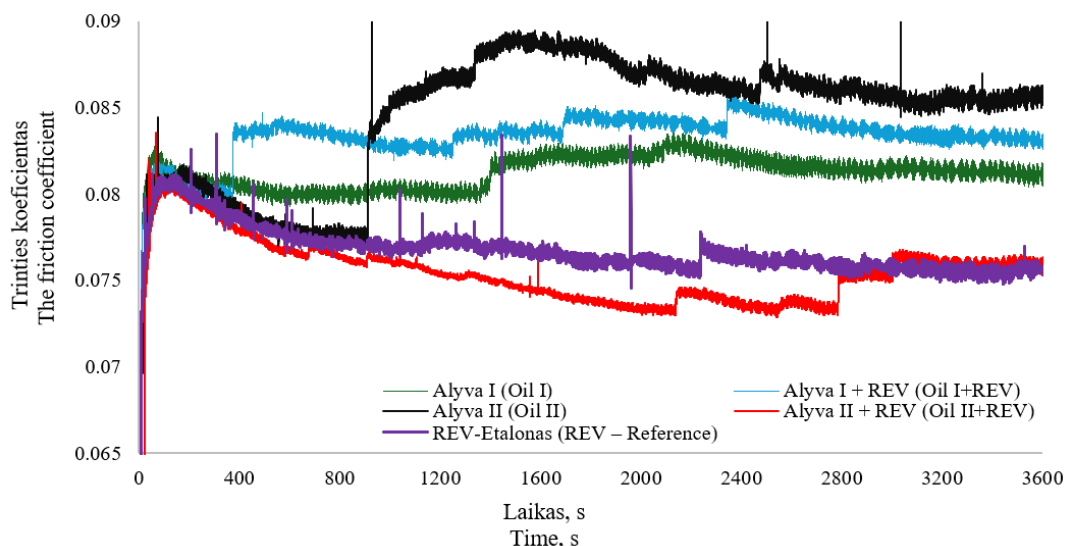
Bandymo metu registruotas trinties momentas M (N·m) ir alyvos temperatūra T (°C). Trinties koeficientas apskaičiuotas pagal formulę: $\mu = \frac{M}{n \cdot F_n \cdot k \cdot r}$, kur F_n – normalioji jėga, tenkanti vienam kontaktui (N). Temperatūros pokytis nustatytas pagal $\Delta T(t) = T(t) - T_0$, kur $T(t)$ – bandymo metu laiko momentu t išmatuota tepamosios medžiagos temperatūra, °C. Kiekvienas bandymas kartotas po du kartus.

Po bandymų išmatuotas trijų apatinių rutulių dilimo pėdsako skersmuo (μm), naudojant optinį metalografinį mikroskopą „Nikon Eclipse MA100“. Gauti duomenys apdoroti statistškai: apskaičiuoti aritmetiniai vidurkiai, standartiniai nuokrypiai ir 95 % pasikliautiniai intervalai.

Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

Atlikti tribologiniai bandymai leido įvertinti sintetinių variklinių alyvų ir jų modifikacijų revitalizantu veikimą ribinio tepimo sąlygomis esant 150 N ir 300 N apkrovoms. Analizuoti trinties koeficiento kitimo dėsningumai, vidutinio trinties momento ir temperatūros pokyčiai bei dilimo pėdsakų charakteristikos. Rezultatų sklaida įvertinta apskaičiuojant 95 % pasikliautinius intervalus, taikant Stjudento skirstinį (Markšaitis, Navickienė, 2012).

Trinties koeficiento kitimo kreivės (žr. 1 ir 2 pav.) visais atvejais pasižymėjo pradine prisidirbimo faze, trunkančia apie 300–600 s. Šiame etape stebėti didesni svyravimai, susiję su paviršių mikroreljefo prisitaikymu ir realaus kontaktinio ploto formavimusi. Stabilizacijos fazėje trinties koeficientas tapo pastovesnis, kas rodo nusistovėjusį ribinio tepimo režimą. Toks procesas būdingas sistemoms, veikiančioms ribinio tepimo sąlygomis, kai tepimo plėvelės storis nėra pakankamas visiškai atskirti kontaktuojančius paviršius (Bhushan, 2013).

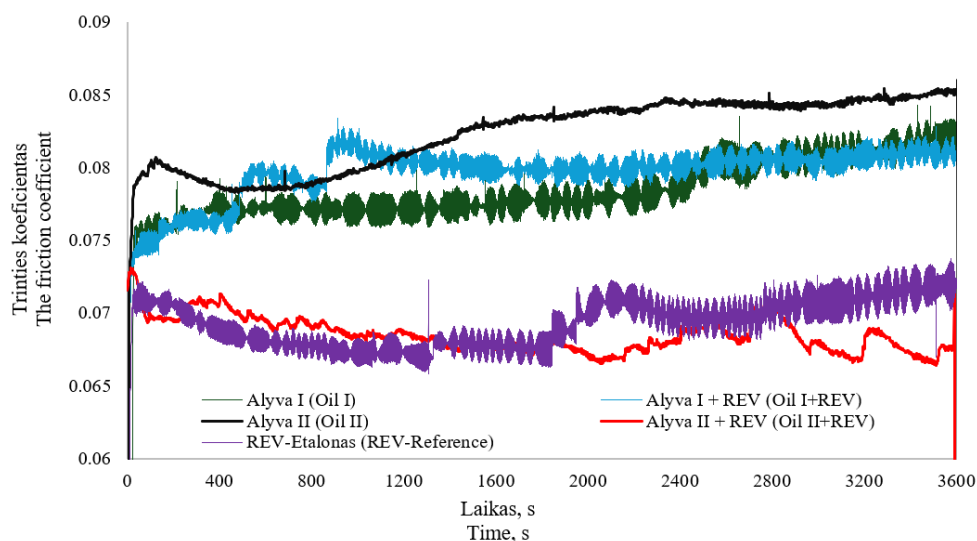


1 pav. Trinties koeficiento kitimas tyrimą atliekant 150 N apkrova

Fig. 1. Variation of the friction coefficient during the test under a load of 150 N

Esant 150 N apkrovai (žr. 1 pav.), skirtingų alyvų trinties koeficiento reikšmės buvo panašios. Alyvos I ir Alyvos I + REV kreivės bei jų pasikliautiniai intervalai persidengė, todėl revitalizanto poveikis šiai alyvai laikytinas minimaliu. Alyvos II atveju nustatyta šiek tiek didesnė trinties koeficiento reikšmė, tačiau įmaišius revitalizantą stebėtas jos sumažėjimas. Nors skirtumas nėra ryškus, matoma mažėjimo tendencija leidžia manyti, kad priedas prisideda prie kontaktinių procesų stabilizavimo.

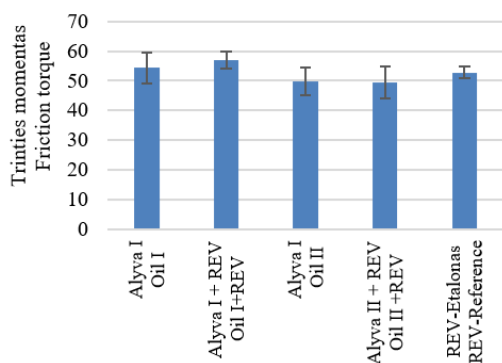
Padidinus apkrovą iki 300 N (žr. 2 pav.), visiems bandiniams nustatytas trinties koeficiento padidėjimas. Tai atitinka kontaktinės mechanikos principus – didėjant apkrovai didėja realus sąlyčio plotas ir sąlyčio slėgis, todėl ribinio tepimo sąlygomis trintis intensyvėja (Bhushan, 2013). Tačiau Alyvos II + REV atveju koeficiento augimas buvo mažesnis nei bazinėje alyvoje, kas rodo galimą aktyvesnį revitalizanto veikimą esant didesnei apkrovai.



2 pav. Trinties koeficiento kitimas tyrimą atliekant 300 N apkrova

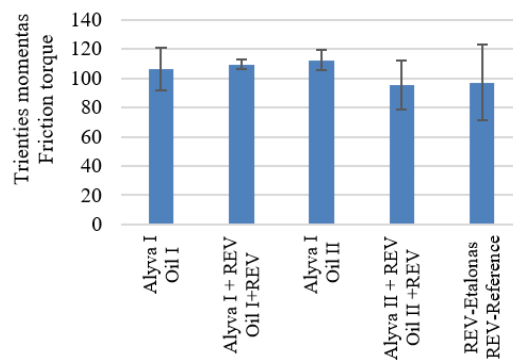
Fig. 2. Variation of the friction coefficient during the test under a load of 300 N

Vidutinio trinties momento analizė (žr. 3 ir 4 pav.) patvirtina trinties koeficiento dėsningumus. Esant 150 N apkrovai momentų skirtumai tarp alyvų buvo nedideli, o rezultatų sklaida išliko santykinai maža. Esant 300 N apkrovai momentų reikšmės padidėjo, o kai kurių bandinių variacija išaugo. Alyvos II + REV atveju nustatytas apie 16 % mažesnis vidutinis trinties momentas, kas rodo efektyvesnę kontaktinių paviršių apsaugos mechanizmą. Literatūroje tokie pokyčiai siejami su tribocheminių reakcijų metu susidarancia apsaugine plėvele, mažinančia tiesioginį metalų kontaktą (Spikes, 2004).



3 pav. Vidutinis trinties momentas bandymo metu esant 150 N apkrovai

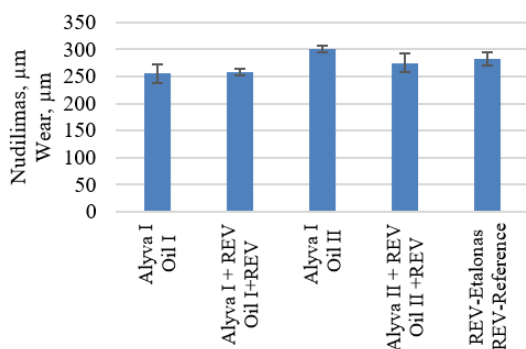
Fig. 3. Average friction torque during the test under a load of 150 N



4 pav. Vidutinis trinties momentas bandymo metu esant 300 N apkrovai

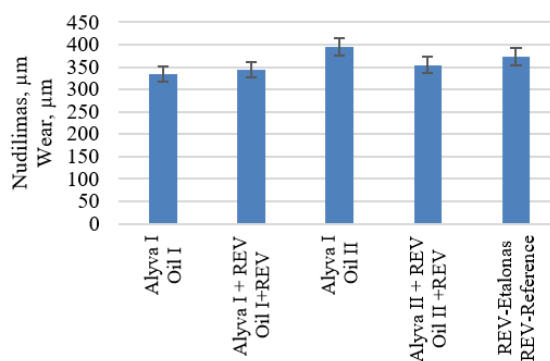
Fig. 4. Average friction torque during the test under a load of 300 N

Temperatūros matavimai parodė aiškią priklausomybę tarp taikomos apkrovos ir temperatūros pokyčių tribologinėje sistemoje – didėjant apkrovai temperatūra augo. Tai atspindi energijos transformacijos procesus, kai dalis mechaninės energijos trinties metu virsta šiluma (Mang, Dresel, 2017). Alyvos II + REV sistemoje temperatūros kilimas buvo mažesnis nei bazinėje alyvoje, o tai koreliuoja su mažesniu trinties momentu. Tokia sąsaja rodo, kad revitalizanto naudojimas gali mažinti energijos nuostolius dėl trinties.



5 pav. Nudilimas, μm , esant 150 N apkrovai

Fig. 5. Wear, μm , under a load of 150 N



6 pav. Nudilimas, μm , esant 300 N apkrovai

Fig. 6. Wear, μm , under a load of 300 N

Dilimo pėdsakų analizė (žr. 5 ir 6 pav.) atskleidė aiškų apkrovos poveikį paviršių dilimui. Esant 150 N apkrovai mažiausi nudilimo rodikliai nustatyti naudojant Alyvą I, o Alyvos I + REV rezultatai buvo labai artimi ir jų pasikliautiniai intervalai persidengė. Tai rodo, kad mažesnės apkrovos sąlygomis revitalizanto poveikis šiai alyvai yra ribotas. Alyvos II sistemoje nudilimas buvo didesnis, tačiau įmaišius revitalizantą dilimo pėdsako skersmuo sumažėjo. Intervalų analizė rodo mažesnę persidengimą, kas leidžia kalbėti apie aiškesnę mažėjimo tendenciją.

Esant 300 N apkrovai nudilimo vidurkiai padidėjo, kas atspindi intensyvesnę kontaktinį apkrovimą ir plonesnę tepimo plėvelę. Alyvos II + REV atveju nudilimo sumažėjimas buvo ryškesnis nei esant 150 N apkrovai. Paviršiaus morfologinė analizė parodė tolygesnius rėžius ir mažesnę deformacijos zoną modifikuotoje alyvoje, kas būdinga apsauginiam tribologiniam sluoksniui, susidaranti aktyvių priedų sąveikos su metalo paviršiumi metu (Smigins et al., 2025).

Išvados

1. Atlikti tyrimai parodė, kad sintetinių variklinių alyvų tribologinės savybės ribinio tepimo sąlygomis priklauso nuo apkrovos dydžio ir bazinės alyvos sudėties. Didėjant apkrovai stiprėja kontaktinių paviršių sąveika ir didėja temperatūra trinties zonoje, todėl aktyviau pasireiškia priedų įtaka trinties ir dilimo procesams.
2. Revitalizanto įtaka nėra universali – jo efektyvumas priklauso nuo konkrečios alyvos sudėties. Vienos alyvos atveju reikšmingų pokyčių nenustatyta, tuo tarpu kitos alyvos sistemoje stebėta trinties ir dilimo mažėjimo tendencija, ypač esant didesnei apkrovai.
3. Padidėjus apkrovai, revitalizanto poveikis tampa labiau išreikštas, kas leidžia daryti prielaidą apie aktyvesnius tribocheminius procesus kontaktinėje zonoje ir galimą apsauginės triboplėvelės formavimąsi.
4. Paviršiaus morfologinė analizė patvirtino, kad modifikuotoje alyvoje susidaro tolygesnis kontaktinis paviršius ir mažesnio intensyvumo plastinės deformacijos zona, kas siejama su geresnėmis antidiliminėmis savybėmis.
5. Gauti rezultatai leidžia teigti, kad iškelta hipotezė apie revitalizanto galimą teigiamą poveikį trinties ir dilimo mažinimui patvirtino iš dalies – efektas priklauso nuo apkrovos dydžio ir tiriamos alyvos.

Literatūra

1. Bhushan, B. (2013). *Introduction to Tribology*. John Wiley & Sons.
2. Biswas, D., Horng, J.-H., Adhitya, A., & Ahsan, Q. (2021). Investigation of running-in process based on surface roughness parameters, real contact area ratio and tribological properties. *FME Transactions*, 49(4), 988–996. <https://doi.org/10.5937/fme2104988B>
3. Ujita, H., & Spikes, H. A. (2004). The formation of zinc dithiophosphate tribofilms. *Tribology Letters*, 17(2), 469–489. <https://doi.org/10.1023/B:TRIL.0000044495.26882.76>
4. Mang, T., Dresel, W. (2017). *Lubricants and Lubrication* (3rd ed.). Wiley-VCH.
5. Markšaitis, H., Navickienė, O. (2012). *Tikimybių teorija ir matematinė statistika*. Vilnius: Mykolo Romerio universitetas.
6. Smigins, R., Žunda, A., Andriušis, A., Acar, Ç. G., Tučkutė, S. (2025). The influence of atomic metal conditioner additive with surface revitalizer on the lubricating properties of engine oil. *Lubricants*, 13(7), 284. <https://doi.org/10.3390/lubricants13070284>
7. Spikes, H. A. (2004). The history and mechanisms of ZDDP. *Tribology Letters*, 17(3), 469–489. <https://doi.org/10.1023/B:TRIL.0000044495.26882.76>
8. Totten, G. E. (Ed.). (2014). *Handbook of Lubrication and Tribology*. CRC Press.

EVALUATION OF THE LUBRICATING PROPERTIES OF ENGINE OIL MODIFIED WITH REVITALIZERS

Summary

This study investigates the lubricating properties of synthetic SAE 5W-30 engine oils modified with a revitalizing additive under boundary lubrication conditions. The objective was to evaluate the influence of the revitalizer on friction and wear characteristics and to determine the effect of load on tribological performance. Experimental tests were carried out using the four-ball method according to DIN 51 350 standard at loads of 150 N and 300 N. During testing, friction torque and temperature were recorded, the coefficient of friction was calculated, and wear scar diameters were measured after each test. Statistical analysis included the calculation of arithmetic means, standard deviations, and 95% confidence intervals.

The results showed that increasing load intensified friction processes and heat generation, making the tribological system more sensitive to additive effects. The effectiveness of the revitalizer depended on the base oil composition. For one oil, no statistically significant changes were observed, whereas for the other oil a reduction in friction torque and wear was detected at 300 N load. The findings indicate that the revitalizer effect is not universal and becomes more pronounced under higher contact loads, where tribochemical processes and potential tribofilm formation are more active.

Keywords: tribology; synthetic engine oil; revitalizer additive; boundary lubrication; coefficient of friction; friction torque; wear; tribofilm.