Doktori értekezés

Tóth Álmos Dávid

Széchenyi István Egyetem

2021.

Tóth Álmos Dávid

Nano-méretű kerámia szemcsék kenőolaj adalékként való alkalmazhatóságának vizsgálata tribológiai módszerekkel

Doktori értekezés

Témavezető:
Dr. Kuti Rajmund
Széchenyi István Egyetem

Közlekedés- és járműtudományok
Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola

Győr, 2021.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés ... 1
1.1. A kutatási téma ismertetése és a célkitűzések ... 1
1.2. A dolgozat felépítése ... 2
2. A kutatás aktualitása, szükségessége és helye a tudományterületben ... 3
3. Tribológiai alapok ... 9
3.1. Kenőolajok szerepe egy belsőégésű motorban ... 9
3.1.1. Súrlódás-, kopás-, és kenéselméleti alapok ... 10
3.1.2. Kenőolajok súrlódásra és kopásra gyakorolt tulajdonságai ... 17
3.2. Kenőolajok fejlesztési irányelvei ... 25
3.2.1. Kenőolajok viszkozitásának csökkenése ... 25
3.2.2. Ionos folyadékok ... 26
3.2.3. Új generációs kenőolaj adalékok ... 27
3.3. Kenőolajok vizsgálatainak módszerei ... 28
3.3.1. Kenőolaj minta előkészítése ... 31
3.3.2. Kenőolaj minták súrlódásvizsgálati lehetőségei ... 33
3.3.3. Kenőolaj minták okozta kopásvizsgálati lehetőségek összehasonlítása ... 35
3.3.4. Kenőolaj minták kopásra gyakorolt hatásainak vizsgálati lehetőségei ... 38
4. Nanoméretű kerámiaszemcsék kenőolaj adalékként való alkalmazhatóságának szakirodalmi áttekintése ... 40
4.1. Nanoméretű kerámia kenőolaj adalékok ... 40
4.1.1. Cirkónium(IV)-oxid kerámia ... 45
4.1.2. Réz(II)-oxid kerámia ... 48
4.1.3. Ittrium(III)-oxid kerámia ... 52
4.2. Számítógépes szimulációk alkalmazási lehetőségei és korlátai a tribológiai fejlesztések során ... 54
4.3. A kutatás célkitűzései ... 55
5. Laboratóriumi vizsgálatokhoz alkalmazott berendezések ... 57
6. Vizsgálati módszerfejlesztés kenőolajminták tribológiai tulajdonságainak valósághű elemzése érdekében ... 58

6.1. ISO 19291:2016 kenőolaj tribológiai vizsgálatok szabványa 58
6.2. Castrol 5W-30 típusú motorolaj szabványos tribológiai vizsgálata 62
6.3. Vizsgálati módszer fejlesztés Castrol 5W-30 típusú motorolaj tribológiai tulajdonságainak elemzésére 64
6.3.1. A vizsgálati paraméterek hatásainak elemzése 65
6.3.2. Kenési rendszer fejlesztése 74
7. Nanoméretű szemcsékkel adalékolt kenőolajminták előkészítési folyamata 80
8. Kenőolajban homogenizált nanoméretű kerámia szemcsék tribológiai tulajdonságainak vizsgálata 82
8.1. Referenciavizsgálatok 86
8.2. Cirkónium(IV)-oxid nanokerámia szemcsékkel elvégzett vizsgálatok eredményei 95
8.3. Réz(II)-oxid nanokerámia szemcsékkel elvégzett vizsgálatok eredményei 103
8.4. Ittrium(III)-oxid nanokerámia szemcsékkel elvégzett vizsgálatok eredményei 116
9. Összegzett következtetések 126
10. Új tudományos eredmények összefoglalása 128
11. Összefoglalás és további kutatási irányok 131
12. Summary and further research possibilities 133
Köszönetnyilvánítás 134
Ábrajegyzék 135
Táblázatok jegyzéke 140
Rövidítések és szimbólumok jegyzéke 141
Irodalomjegyzék 144
Mellékletek 158

1. Bevezetés

1.1. A kutatási téma ismertetése és a célkitűzések

A mai korszerű járművekben üzemelő belsőégésű motoroknak folyamatosan szigorodó követelményeknek kell megfelelniük. Ezen követelmények három csoportba sorolhatók: nemzetközi szabályozások (EURO7), vevői elvárások, illetve gyártói igények. Az emberi élettér védelme és egészségre gyakorolt káros hatásának csökkentése érdekében nagyon szigorú károsanyag-kibocsátási normák vannak érvényben, amelyeknek minden újonnan engedélyeztetett járműnek meg kell felelni. Az ilyen szabályozott károsanyagok közé tartozik a szén-monoxid (CO), nitrogén-oxidok (NO_x), elégetlen szénhidrogének (HC), illetve a motorban keletkező korom részecskék. Ezen károsanyagok mellett a szabályozott anyagok közé tartozik a szén-dioxid (CO_2) is. A vevői elvárások között megemlítendők az alacsony karbantartási költségek, kényelem, illetve az alacsony ár, a gyártók számára pedig az alacsony gyártási költségek és a rövid gyártási idők bírnak kiemelt jelentőséggel.

A fent említett követelmények teljesítése érdekében a járműgyártó óriáscégek és mérnökeik különböző megoldásokat fejlesztettek ki: elektromos hajtású járművek, hibrid hajtáslánc, turbófeltöltő alkalmazása minden belsőégésű motor esetén, alacsony viszkozitású kenőolajok és ezekkel üzemelni képes hajtáslánc, újszerű motortechnikai anyagok és bevonatok stb. Annak érdekében, hogy az egyes mérnöki megoldásokban rejlő lehetőségeket maximálisan kihasználják, a járművek hajtásláncában található összes elemnek egymással harmóniában kell működniük.

Az emberi élettér egészségességének megőrzése érdekében nem csak a járművek működése során (tank-to-wheel) kibocsátott szén-dioxid mennyiségét szükséges vizsgálni és szabályozni, hanem az üzemanyag gyártása során keletkező (well-to-tank) károsanyagokat is, illetve a járművek gyártási és későbbi újrahasznosítási folyamatai során keletkező emissziót is figyelembe kell venni (Life Cycle Assessment).

Minden ismétlődő mozgással üzemelő berendezés számára nélkülözhetetlen a megfelelő kenéstechnika és kenőanyag. Egy belsőégésű motor esetén ezen kijelentés hatványozottan igaz: a kenőolaj egy motorban nagyon komplex igénybevételeknek (mechanikai és hőigénybevétel) van kitéve. A motorokban használt kenőolaj kritikus eleme a hajtáslánc ezen egységének, hiszen Wang és társai tanulmánya [1] szerint a világ elsődleges energiafelhasználásának egyharmada a súrlódási veszteségek által hasztalanul kerül felhasználásra. Továbbiakban megemlítendő, hogy a mechanikai berendezések károsodásának

60 százalékáért az alkatrészek felületén keletkező kopás tehető felelőssé, míg a mechanikai károsodások több mint 50 százalékáért valamilyen kenési elégtelenség okolható. A belsőégésű motorokban használt kenőolajok folyamatos fejlesztése kiemelt szerepet játszik a jelenlegi és jövőbeli mobilitás szempontjából. A kenőolajok fejlesztésének céljai szerteágazóak: viszkozitás csökkentés, kenőolaj adalékok fejlesztése és optimalizálása, kenőolajok öregedési folyamatainak megértése és szabályozása, vagy akár a jövőbeli lehetséges alternatív üzemanyagok kenőolajra gyakorolt hatásainak szabályozása.

Jelen disszertáció elsősorban a kenőolajok tribológiai hatásainak vizsgálataival és újszerű súrlódás- és kopáscsökkentő kenőolaj-adalékok vizsgálatával foglalkozik. A vizsgálatokhoz egy olyan vizsgálati modellt célszerű használni, amellyel gyorsan, energia- és költséghatékonyan lehet az egyes adalék típusokat és koncentrációkat egymással összehasonlítani.

1.2. A dolgozat felépítése

A dolgozatot egy átfogó ismertetővel kezdem, amely bemutatja a mai közlekedés kihívásait és megoldandó feladatait (2. fejezet). A 3. és 4. fejezetben egy szerteágazó, több tématerületre kiterjedő szakirodalmi áttekintést adok a kenőolajok legfontosabb feladatairól, illetve a kenőolaj tribológiára gyakorolt hatásairól, különös tekintettel a belsőégésű motorban való üzemelésre. A 4.2. fejezetben ismertetett számítógépes szimulációk bonyolultsága miatt a gyakorlati mérések számítanak a komplex tribológiai fejlesztések alapvető módszeréül, így az 5. fejezetben megvizsgáltam a jelenleg is hatályos ISO 19291:2016 szabvány szerinti kenőolaj tribológiai vizsgálatok módszerét, és egy egyedi vizsgálati módszert fejlesztettem ki, amellyel a jelenleg is hatályos szabvány kiegészíthető és pontosítható. A kifejlesztett vizsgálati metódushoz műveleti utasítás is készült annak érdekében, hogy az egymástól független mérések között tapasztalható szórás minimális legyen. A továbbiakban három különböző kerámia anyagból (ZrO_2, CuO és Y_2O_3) készült, nano-méretű részecskét hasonlítottam össze tribológiai szempontokból. A homogén kenőolaj-adalék minta elkészítése kiemelt fontosságú az ilyen típusú vizsgálatok esetén, ezért egy egyedi homogenizálási módszert fejlesztettem ki, amely a 7. fejezetben kerül részletezésre. A nanoméretű kerámia szemcsékkel adalékolt olajminták tribológiai eredményeit a 8. számú fejezet tartalmazza. A disszertáció a tudományos eredmények összegzésével, az eredmények gyakorlati felhasználhatóságával és a további kutatási feladatok részletezésével zárul.

2. A kutatás aktualitása, szükségessége és helye a tudományterületben

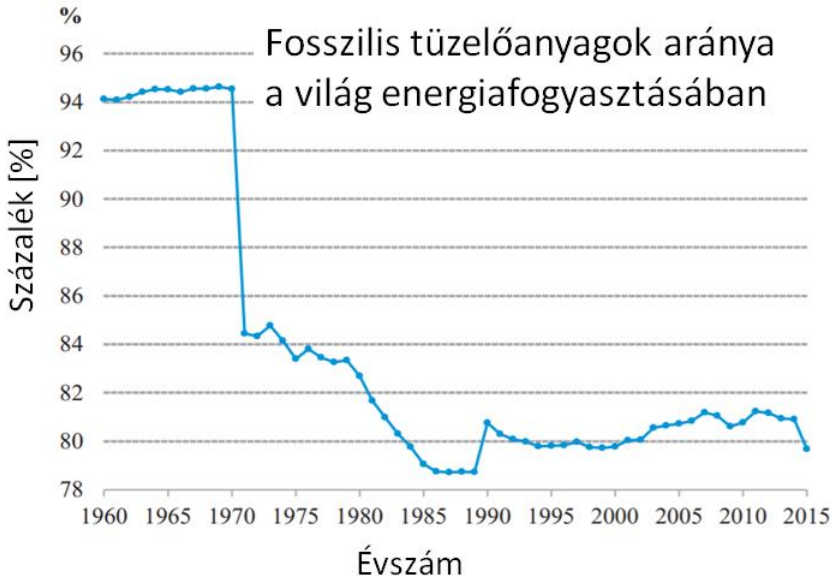
A közlekedés során emittált károsanyagok csökkentésének elsődleges célja az emberi élettér, és ezzel az emberek egészségének védelme. A védelem biztosítása érdekében a nemzetközi szabályalkotók különböző szigorú előírásokat fogalmaznak meg a személygépjármű gyártó cégek számára, amelyek elsődleges célja a különböző keletkező károsanyagok (CO, NO_x, elégetlen szénhidrogének, korom) keletkezési arányának csökkentése. A szabályozandó anyagok közé tartozik a CO_2 is, annak ellenére, hogy hivatalosan ezen égéstermék nem tartozik a károsanyagok csoportjába. A járműgyártók komoly erőforrásokat áldoztak és áldoznak a fejlesztéseikre, amellyel a hatályos előírások betarthatók, és ezen fejlesztések által különböző mérnöki megoldásokkal álltak elő (pl: alacsony súrlódási tulajdonsággal rendelkező bevonatok, alacsony viszkozitású kenőolajok, kipufogógáz utánkezelő rendszerek, hibrid- és elektromos hajtáslánc).

A kenőolajok fejlesztése mindig is kiemelt fontossággal bírt az egymáson érintkező felületek esetében. A kenőolajok mozgatása és áramoltatása a motorban egy olyan energiaigényes folyamat, amelyhez szükséges energiát a motor által előállított energiából kell fedezni. A kenőolaj által okozott súrlódási veszteségek szintén fogyasztás-növekedést és ezáltal károsanyag-kibocsátás növekedést eredményeznek. A belsőégésű motorok számára a kenőolaj kiemelt fontosságú, azonban az elektromos hajtások számára is nélkülözhetetlen: az elektromos hajtások is rendelkeznek olyan váltóművekkel, amelyek kenés nélkül nem üzemképesek. A kenőolajok nem csak a súrlódási veszteségek csökkentése és ezáltal az üzemanyag-fogyasztás csökkentése szempontjából bírnak kiemelt jelentőséggel, hanem az alkatrészek élettartamát is döntően befolyásolják. Egy alacsonyabb élettartamú berendezés vagy alkatrész megnöveli a berendezések üzemképtelenségi idejét, növeli a karbantartási igényt, többlet hulladékot eredményez, amely szintén környezetszennyező hatással bír.

A kenőolaj fejlesztés a mai világban található nagyszámú különböző berendezés miatt is kiemelt fontossággal bír. Minden olyan berendezés, amely egymáson folyamatosan elmozduló alkatrészekkel rendelkezik, igényel valamilyen típusú kenőanyagot, legyen szó akár kenőolajról, kenőzsírról vagy szilárd halmazállapotú kenőanyagról (pl: teflon). Annak érdekében, hogy a mechanikai berendezések a lehető leghatékonyabban üzemeljenek mind funkcionális, mind tribológiai szempontból, a kenőanyagokat és azok összetételét folyamatosan fejleszteni szükséges. A fejlesztés minden esetben többlépcsős: költséghatékony vizsgálatokkal elemezni kell az anyagok alapvető tulajdonságait, majd a továbbiakban a

komplex módon megalkotott kenőanyag mintát valósághű felépítményben is tesztelni szükséges megfelelően széleskörű szempontrendszer alapján.

A mai modern közlekedés egyik leggyakrabban használt eszköze a személygépkocsi, amelyek meghajtására és mozgatására éves szinten jelentős mennyiségű fosszilis üzemanyag szükséges. Az 1. ábra ismerteti a világ fosszilis tüzelőanyag igényét az egyes naptári években, amelyből látszik, hogy az utóbbi 50 évben nem sikerült lecsökkenteni az ilyenfajta energiahordozók arányát a világ energiafogyasztásában [2].

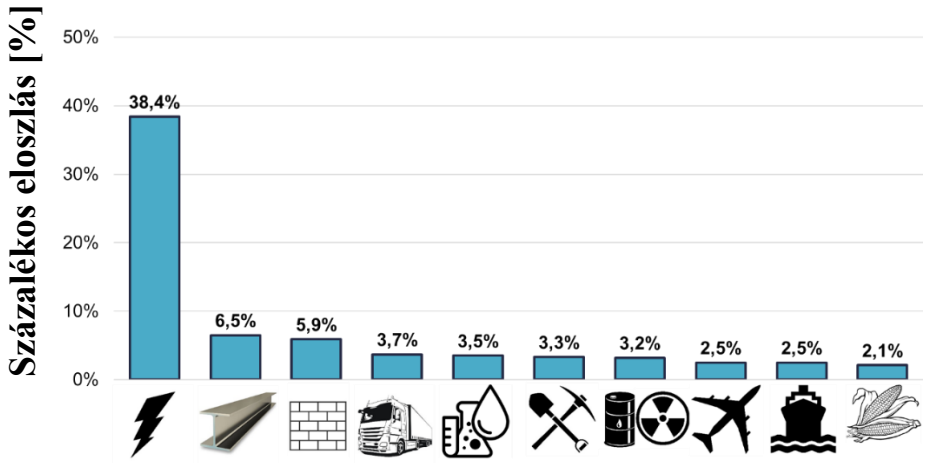


1. ábra: Fosszilis tüzelőanyagok aránya a világ energiafogyasztásában [2]

A közlekedésben részt vevő járművek típusai szintén eltérőek: belsőégésű, hibrid, tisztán elektromos hajtás. Ezen hajtásláncok közös tulajdonsága, hogy mindegyikhez jelentős mennyiségű energiaforrás szükséges, amelyek előállítása és tárolása költséges és környezetszennyező lehet. További közös tulajdonságként megemlítendő, hogy minden járműhajtás tartalmaz olyan folyamatosan mozgó és egymáson súrlódó alkatrészeket, amelyek valamilyen kenőanyaggal történő kenése elengedhetetlen a maximálisan elérhető hatékonyság érdekében.

Az egyes felhasználható energiahordozókat szintén egy megfelelő folyamat mentén elő kell állítani: a kőolaj-finomítás és az áramtermelés szintén széndioxid-kibocsátást vonz maga után, amely a környezet számára szintén károsító hatással bír. A 2. ábra kiválóan szemlélteti, mennyi szén-dioxid termelődik a mai világban az egyes ipari szektorokban [3]. Ezen diagram alapján megállapítható, hogy bár az elektromos járművek az üzemelési területükön nulla szén-dioxid kibocsátással képesek üzemelni, a meghajtásukhoz szükséges áram előállítása nagyon

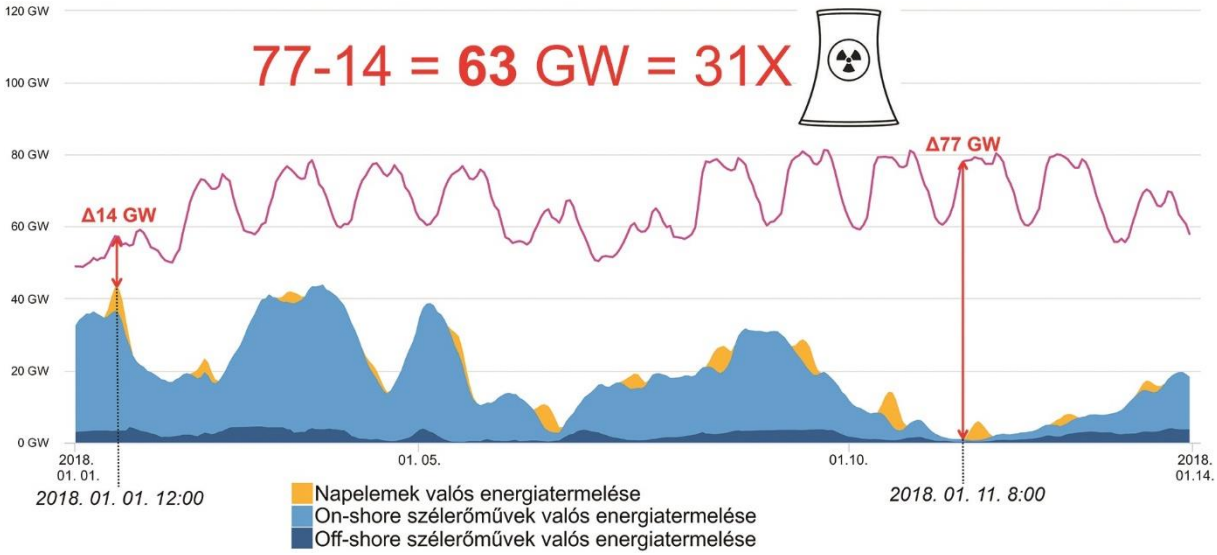
költséges és komoly szén-dioxid tartalmú. A világon megtermelt elektromos áram előállítása során tízszer annyi szén-dioxid keletkezik, mint a belsőégésű motorok üzemelése során.



2. ábra: Különböző ipari ágazatok energiafelhasználásának százalékos eloszlása ([3], szerzői módosítással)

Napjainkban jelentős mennyiségű alternatív, megújuló forrásból származó energiát termelő egység telepítését engedélyezték különböző országokban. Németországban a 2017-es évben 62 GW maximális kapacitású szélerőművet [2] és 52 GW maximális kapacitású napkollektort [4] telepítettek, amely ideális esetben önállóan képes lenne Németország teljes energiaigényét (nagyságrendileg 80-90 GW) kielégíteni. Sajnálatos módon nem minden nap van elegendő napsütés vagy szél, és ezért a szélerőművek átlagos hatásfoka mintegy 18%, míg a napkollektoroké 11% [4]. Természetesen lehetnek olyan napok, hetek, amelyekben a szél egyáltalán nem, vagy csak nagyon csekély mértékben van jelen, és vannak olyan időszakok, amikor a felhős időjárás miatt a napkollektorok sem tudnak üzemelni. Az ilyen esetekre mindenképpen szükséges fenntartani hagyományos, nem megújuló energiaforrással üzemelő erőműveket (a maximális 80-90 GW kapacitás igény is felmerülhet), amely jelentős költségeket eredményez. Továbbiakban, mivel a megújuló forrásokból származó energiatípusnak elsőbbségük van a nem megújulókhoz képest, így előfordulnak olyan időtartamok, amikor a hagyományos erőműveket le kell szabályozni, ezáltal veszítenek hatásfokukból és magasabb veszteségekkel képesek csak működni [4]. A különböző időjárás-függő energiaforrások ingadozását, illetve Németország változó energiaigényeit a 3. ábra szemlélteti. Az elvégzett elemzések alapján kijelenthető, hogy a mai világban is szükség van olyan energiatermelési kapacitások „rendelkezésre állására”, amely időjárás-független. Látható, hogy 2018.01.01-én csupán 14 GW energiát kellett nem megújuló forrásból finanszírozni, míg 2018.01.11-én ez a szám 77 GW-ra adódott. Ez azt jelenti, hogy 63 GW

teljesítményt kell az időjárás változása miatt hol bekapcsolni, hol pedig kikapcsolni, amely 31 db Paks méretű atomerőmű teljesítményével egyezik meg.

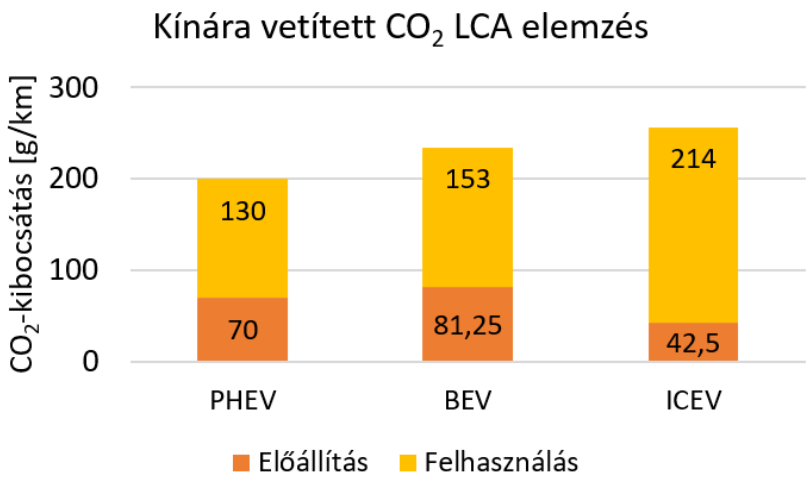


3. ábra: Megújuló energiaforrás-kapacitás és az aktuális energia igény (lila szín) összehasonlítása a német áramfogyasztásban, 2018. január első felében [2]

Az elektromos járművek térnyerésének elsődleges célja az emberi élettér egészségességének megőrzése azáltal, hogy a jármű kipufogójából nem érkezik károsanyag. Annak érdekében, hogy ezen célt elérjük, nem elég csupán a jármű üzemeltetése során keletkező károsanyagokat elemezni, hanem átfogó vizsgálatokra van szükség a legkevésbé környezetszennyező járműhajtás kiválasztásához. Az egyik ilyen elemzési rendszer szerint a járművek teljes élettartamának környezeti lábnyomát elemezni kell, amely angolul Life Cycle Assessment-ként (LCA) ismert. Az utóbbi években nagyszámú, és különböző területekre fókuszáló LCA cikk került publikálásra.

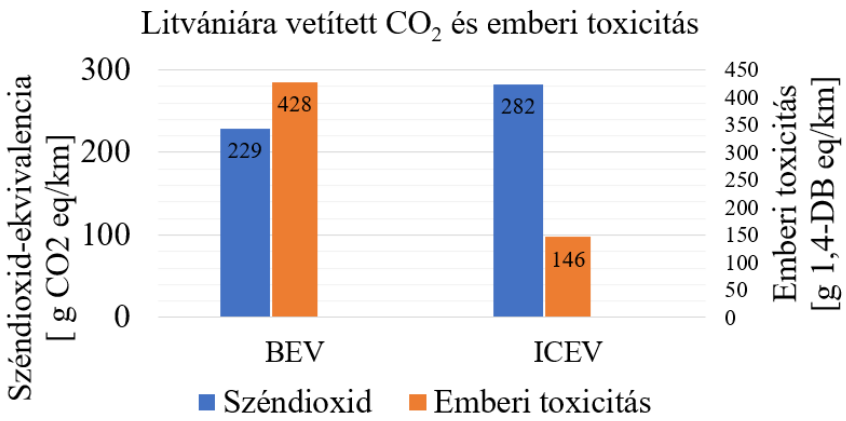
A szakirodalomban fellelhető két olyan cikk, amelyek a kínai [5], illetve a litván [6] autópiacra vetítve elemezték a járművek ökológiai lábnyomát, elsősorban a szén-dioxid, illetve az emberi szervezetre káros, toxikus gázok kibocsátását. Az LCA-elemzés során elsősorban a járművek előállítását és üzemeltetését vették figyelembe, és az üzemeltetést egységesen 150.000 km-es távolságban határozták meg. Az elemzések során figyelembe vették az elektromos járművek hajtásához szükséges energia előállítását, a helyi energiagyártás károsanyag-kibocsátásának megfelelően. A kínai piacra vetített tanulmányok összefoglaló eredményeit a 4. ábra, míg a litván piacra vonatkozó szakirodalmi források kiértékelését az 5. ábra ismerteti. Az eredmények alapján egyértelműen megállapítható, hogy bár a belsőégésű motorral szerelt járművek (internal combustion engine vehicle – ICE)

üzemeltetése során magasabb a CO_2-kibocsátás, addig az elektromos járműveknél (battery electric vehicle – BEV) a gyártás okoz nagyobb környezeti terhelést, és összesítve nincs túlságosan nagy különbség köztük. Egy lehetséges alternatíva a Plug-in hibrid járműkategória (Plug-in Hybrid electric vehicle – PHEV), amely esetén mind a gyártás, mind pedig az üzemeltetés során kibocsátott széndioxid mennyisége csökkenthető.



4. ábra: Különböző járműhajtások széndioxid-kibocsátása élettartam-elemzés alapján, a kínai járműveket figyelembe véve ([5, 7-9], szerzői kiegészítéssel)

A litván kutatás ennél tovább vizsgálódott és a széndioxid-kibocsátás mellett figyelembe vette az emberekre toxikusan ható gázok hatását is. Ezek alapján egyértelműen megállapítható, hogy az elektromos autók már jelentős hátrányban vannak, hiszen az akkumulátorok gyártásakor nagymennyiségű mérgesgáz keletkezik, amely káros az emberi élettérre és káros a bolygónkra is.



5. ábra: Különböző járműhajtások széndioxid- és emberi toxicitás növelő egyéb gázok kibocsátása élettartam-elemzés alapján, a litván járműveket figyelembe véve ([6, 9-19], szerzői kiegészítéssel)

A fent említett adatokból egyértelműen kivehető, hogy az elektromos járműveknek van létjogosultságuk, hiszen a lokális emisszió-mentes jármű üzemeltetés sok nagyváros számára kecsegtető lehet [20], azonban a bolygónkat a jelenlegi áramtermelési kultúra mellett elektromos járművekkel nem tudjuk teljesen megmenteni, így a belsőégésű motorokkal felszerelt járművek a belátható jövőben életünk szerves részét fogják képezni. Természetesen a hibrid hajtású járművek egy kiváló alternatívát jelentenek, amellyel egy adott mennyiségű hatótávot tisztán elektromos hajtással is meg lehet tenni (és így a jövőbeli esetleges nagyvárosi szabályokat betartani), és emellett a hosszabb távokon belsőégésű motorral üzemelve is tudunk hatékonyan közlekedni.

Amíg a belsőégésű motorral szerelt járművek megmaradnak, addig a járműveknek biztosan szükségük lesz komplex igénybevételeket elviselni képes kenőolajokra. Ezen folyamatos továbbfejlesztéseknek a mai és a jövőbeli kutatások szerves részét kell képeznie. Egy jól megválasztott kenőolajjal, alacsony viszkozitással és megfelelő adalékokkal a súrlódási veszteségek jelentősen csökkenthetők, amely közvetlen hatással van egy belsőégésű motor hatásfokára. Fontos megjegyezni azonban, hogy egy járműben nem csak a belsőégésű motorban van szükség kenőolaj alkalmazására: a járművek sebességváltóinál is, illetve egy elektromos jármű bolygóművében is elengedhetetlen a megfelelő kenőolaj használata, amely az egymáson folyamatosan elmozduló alkatrészek kenése mellett az alkatrészek hűtésében és fűtésében is kritikus szerepet tölt be.

Fontos kiemelni, hogy az emberi élettér védelme érdekében hozott intézkedések szerteágazó hatással lehetnek környezetünkre. Annak érdekében, hogy bolygónkat globálisan és lokálisan is megvédjük, jövőjét biztosítsuk, a nemzetközi és helyi kormányoknak és irányító szerveknek együtt kell működniük. A meghozott intézkedéseknek összhangban kell lenniük, törekedni kell betartásukra, illetve az elért hatást folyamatosan figyelni és ellenőrizni kell egy esetleges későbbi újabb intézkedés meghozatala érdekében [21]. A bolygónk védelme ezek alapján nem csak a közlekedési szektortól függ, a teljes energetika, a mezőgazdasági szektor és a lakossági fogyasztás is hatással van életterünkre, így ezek hatásait ugyanúgy figyelembe kell venni, mint a közlekedést.

3. Tribológiai alapok

A kutatási témában fellelhető irodalom nagyon szerteágazó és széleskörű, ezen irodalmi források felkutatása és feldolgozása kiemelt fontossággal bírt a kutatás kezdeti fázisában. A tribológia, mint tudományág, az 1960-as években alakult ki, amely magában foglalja az egymással mechanikai kölcsönhatásban lévő testek súrlódási, kopási és kenési folyamataihoz kapcsolódó területeket. A tudományág sokrétűsége okán a disszertációban a kutatási témához szorosabban kapcsolódó területek kerülnek kifejtésre.

Először egy rövid áttekintést kívánok adni a kenőolajok általános szerepéről egy olyan komplex mechanikai rendszerben, mint a belsőégésű motor és ismertetem a kritikus tribológiai alapokat, amelyek kiemelt szerepet töltenek be a kutatási eredmények értelmezésében. A fejezet további részeiben ismertetem az irodalomban fellelhető, különböző kenőolaj vizsgálati módszereket is.

3.1. Kenőolajok szerepe egy belsőégésű motorban

Egy belsőégésű motor számára a motorolaj olyan, mint az emberi testben található vér, működéséhez elengedhetetlen [22-24].

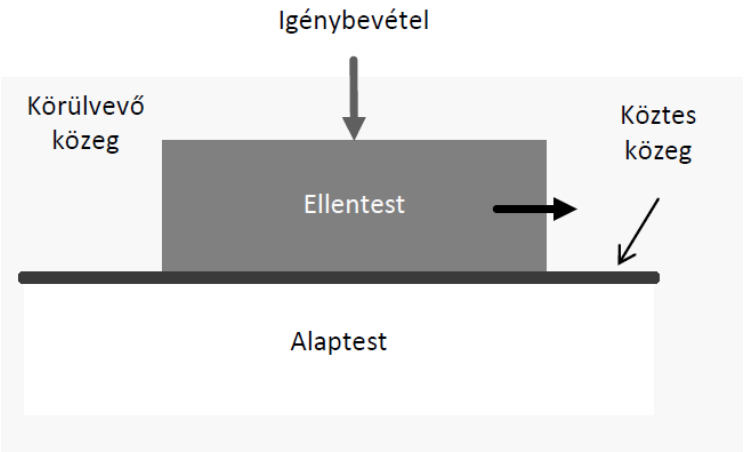
- A kenőolajnak elsődleges feladata az egymással kapcsolatban lévő alkatrészek védelme, a köztük kialakuló súrlódás és kopás csökkentése.
- Ezen felül az olaj kitölti a megmunkálási hézagokat, tehát az olaj tömítő szerepe szintén kritikus, például a hengerfal és dugattyúgyűrű kapcsolat esetén.
- Egy belsőégésű motorban találhatók olyan helyek, amelyek sem levegő, sem pedig vízhűtéssel nem hűthetők, így a hőelvezetést a motorban található és keringő kenőolajnak kell ellátnia, például a főtengely siklócsapágyazása.
- A motorolaj nem csak a hőelvezetésben játszik kritikus szerepet, a motor egyes alkatrészeit fel kell melegíteni a megfelelő hőmérsékletre, amely szintén a motorolaj feladata, például a szelepvezérlés elemei.
- Az egymáson súrlódó alkatrészek működése során elkerülhetetlen az apró szemcsék leválása a felületről. Ezeket el kell szállítani a keletkezési helyükről, amely szintén a motorolaj feladata.
- A motorban találhatók olyan berendezések, amelyek mozgatásához hidraulikus folyadék szükséges, például a hidraulikus szelephézag-kiegyenlítő vagy a vezérműtengelyek szárnylapátos fázisállítója. Ezek mozgatásához szükséges közegként szintén a motorolaj használatos.

A kenőolajjal szemben támasztott komplex követelmény-rendszer teljesítése érdekében sokrétű és folyamatos fejlesztési munka elvégzése szükséges.

3.1.1.Súrlódás-, kopás-, és kenéselméleti alapok

A tribológia az egymáson elmozduló, egymással mechanikai kölcsönhatásba kerülő alkatrészek érintkező felületeinek egymásra gyakorolt hatásait vizsgáló tudományág. A tribológia magába foglal három, egymástól nehezen elválasztható területet: súrlódás, kopás és kenés [25].

A tribológiai vizsgálatok során egy olyan modellezett tribológiai rendszer használandó, amely behatárolja az egymással kölcsönhatásban lévő elemeket. A 6. ábra ismerteti ezt a rendszert.



6. ábra: A tribológiai rendszer sematikus ábrája ([25], szerzői módosítással)

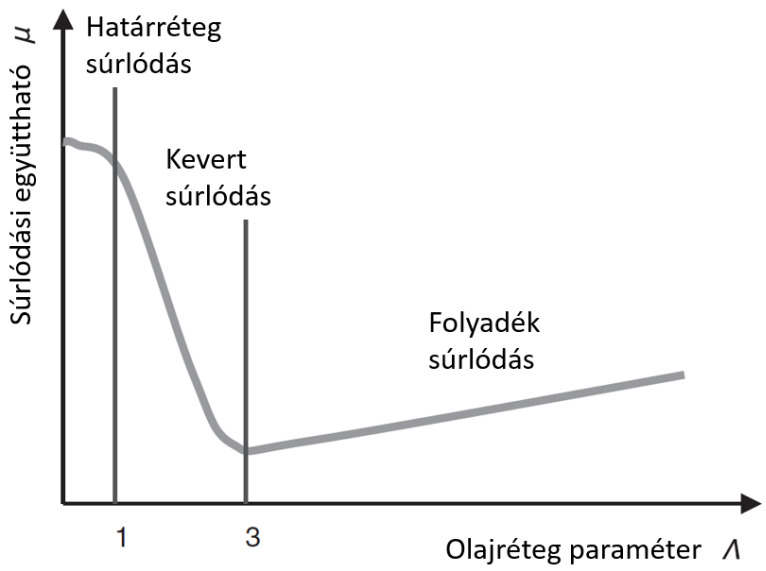
A tribológiai rendszer elsősorban az egymással kölcsönhatásban lévő alaptestből, ellentestből, a köztük lévő köztes közegből, illetve a körülvevő közegből áll. Ezen elemek tulajdonságai (úgy, mint anyagminőség, keménység, felületi érdesség, viszkozitás, kémiai agresszió stb.) alapvetően meghatározzák az egység működését és a rendszer súrlódási és kopási veszteségeit. A tribológiai rendszer összes elemének paramétereit ismerni kell a vizsgálatok eredményeinek értelmezése és magyarázata érdekében.

Egy tribológiai kísérlet során kiemelt fontossággal bírnak a vizsgálandó tribológiai rendszer bemeneti paramétereinek (mozgásviszony, tribológiai terhelés, hőmérséklet) folyamatos mérése és szabályozása, illetve a kimeneti paraméterek megfelelő mintavételi gyakorisággal való rögzítése. A kimeneti paraméterek mérési módszere sok esetben kulcsfontosságú: a súrlódási együttható mérése legalább másodpercenként szükséges, és a méréshez szükséges módszer függ a mozgás fajtájától. Egy alternáló, oszcilláló

mozgásviszony esetén a leggyakrabban használt mérőműszer a piezoelektromos erőmérő szenzor, míg egy forgómozgást megvalósító rendszer esetén valamilyen nyomatékmérő szenzor vagy tárcsa alkalmazása elterjedt. A másik fontos mérendő paraméter a próbatestek felületén keletkező kopás, hiszen amellett, hogy ez alapján lehet következtetni a rendszer tartósságára és élettartamára, a vizsgálat egyes kérdéseire is magyarázatot adhat. A keletkező kopás növelheti a tribológiai rendszer kontaktfelületének nagyságát, illetve megváltoztathatja az érintkező felületek paramétereit (érdesség, kopás, olajtároló képesség stb.). Kopás mérésére több eljárás is létezik, azonban a legtöbb nem képes a vizsgálat során megfelelő pontossággal meghatározni azt. A legtöbb kopásmérési eljárás a tribológiai tesztek után történik, tömegmérést, illetve mikroszkópos méréseket szokás alkalmazni [25].

A műszaki gyakorlatban az egymással érintkező felületeket a legtöbb esetben védeni szükséges az elvárt élettartam érdekében, amelyet különböző kenőanyagokkal valósítanak meg. A járművek esetében a forgó kerekek csapágyazása kenőzsírral kiegészített, míg a belsőégésű motorban, illetve a fogaskerekes váltóban inkább kenőolajokat alkalmaznak. A kenőanyagok, amellett, hogy részt vesznek a mechanikus alkatrészek hőháztartás-szabályozásában, csökkentik a fémes érintkezést, köztes közegként segítenek az egymáson elmozduló alkatrészek közötti súrlódás csökkentésében [23].

Egy tribológiai rendszer esetében a súrlódási veszteségek erősen függenek attól, hogy milyen vastagságú védőfilm alakul ki a két érintkező felület között. Egy alacsony védőréteg növeli a fémes érintkezést és ezáltal a rendszer külső súrlódását a két súrlódó felület között, míg egy túl vastag olajréteg növeli az olajmennyiség mozgatásához szükséges energiát, tehát a belső súrlódási veszteségeket. A rendszer súrlódási veszteségeit az úgynevezett Stribeck-görbe ábrázolja (7. ábra) egy olajfilm paraméter változása függvényében.



7. ábra: A súrlódási együttható és az olajréteg vastagság összefüggése, Stribeck-görbe ([24], szerzői módosítással)

A 7. ábra által ismertetett mennyiségek (μ és Λ) számítása az alábbi képletek segítségével valósítható meg:

$$\mu = \frac{F_S}{F_N}\ [-] \tag{3.1}$$

$$\Lambda = \frac{h}{\sqrt{R_{qA}^2 + R_{qB}^2}}\ [-] \tag{3.2}$$

ahol F_S a súrlódási erő, F_N a felületre ható normálerő, h a felületek közötti olajréteg vastagsága, R^2_{qA} és R^2_{qB} a két súrlódó felület érdessége az A és B pontban [24]. A felületek közötti olajfilm vastagsága a gyakorlatban 1-100 μm közötti érték.

A Stribeck-görbéről leolvasható 3 + 1 olyan súrlódási állapot [24], amelyek segítségével a legtöbb súrlódási rendszer elemezhető és magyarázható:

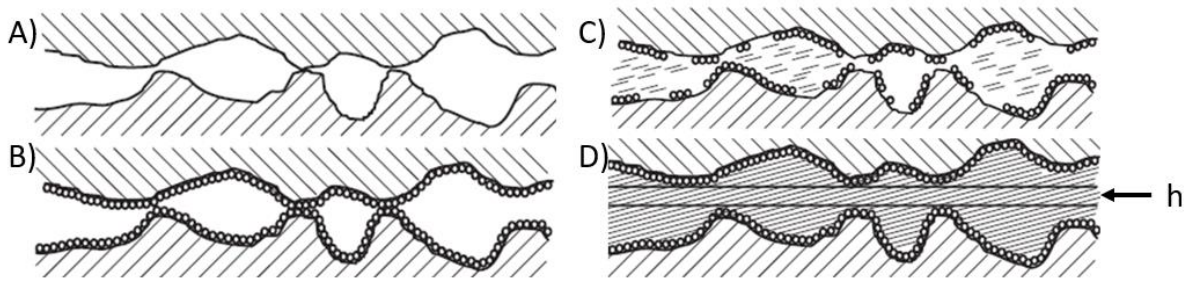
A) Száraz súrlódás: $\Lambda=0$ érték esetén a kenőfilm vastagsága nulla értéket vesz fel, így nincs folyadék a két súrlódó felület között, amely magas súrlódási együtthatót eredményez

B) Határréteg súrlódás: $\Lambda<1$ értékek esetén a felületek közötti folyadékréteg vastagsága egy olyan szintet ér el, hogy egy molekuláris védőréteg keletkezik a súrlódó testek határfelületén, és a köztük lévő relatív elmozdulás ezen a molekuláris rétegen történik.

C) Vegyes súrlódás: Az $1<\Lambda<3$ értékek között a súrlódó felületek között helyenként kialakul egy olyan folyadékréteg, amely már képes teherhordó elemként is viselkedni, azonban nem a teljes érintkező felületen. Vegyes súrlódás esetén az érintkező felületen helyenként folyadék, helyenként határréteg súrlódási állapot alakul ki.

D) Folyadék súrlódás: $\Lambda>3$ esetében az érintkező felületek az érintkezés teljes területén egy jól körül határolható folyadékrétegen keresztül érintkeznek csak, tehát nem lép fel semmilyen fémes érintkezés a két érintkező felület között.

Az egyes súrlódási állapotok sematikus ábráját az 8. ábra ismerteti [24]. A rendszerben a folyadékfilm vastagságának növelésével folyamatosan csökken a két felület között tapasztalható fémes külső súrlódás, míg ezzel ellentétesen a folyadékban megfigyelhető belső súrlódás növekszik, hiszen a folyadék mozgatásához folyamatosan több energiára van szükség. A két súrlódási típus ilyen tulajdonsága révén mindig megfigyelhető egy legalacsonyabb súrlódási együttható érték, amelynél már kellően alacsony a külső súrlódás, de még nem túl magas a folyadék belső súrlódása.



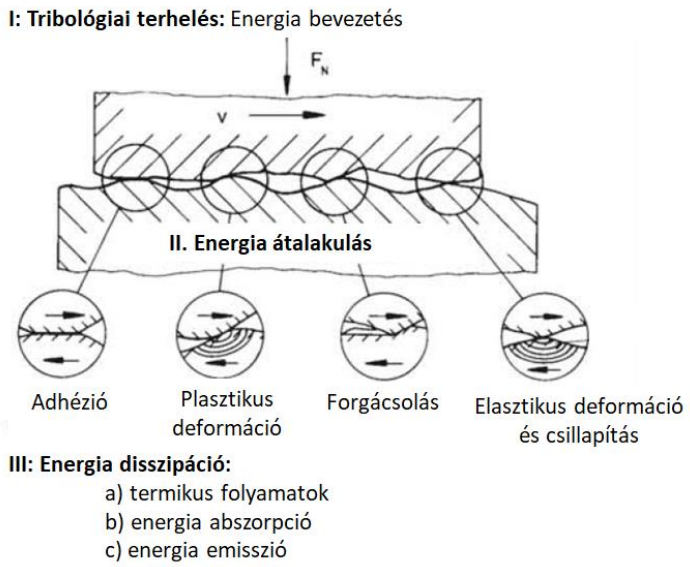
8. ábra: A súrlódási állapotok sematikus ábrái, A) száraz súrlódás, B) határréteg súrlódás, C) kevert súrlódás, D) folyadék súrlódás ([24], szerzői módosítással)

Egy belsőégésű motorban a dugattyúgyűrű-hengerfal kontaktfelületeknél a gyűrűk alternáló mozgást végeznek a hengerfalon, először felfelé, majd lefelé. Ezen alternáló mozgás egyik jellegzetessége, hogy az alsó- illetve a felső holtpontoknál a gyűrű egy rövid pillanatra megáll, majd újra elindul. Ezen mozgásviszony hatására a holtpontoknál határréteg súrlódási állapot lép fel, hiszen a gyűrű sebessége lecsökken nulla értékre. A gyűrű ebben az állapotban kiszorítja a kenőolajat a kontaktfelületről, majd az elinduláskor fokozatosan alakul ki kedvezőbb súrlódási állapot, tehát a határréteg súrlódás előbb kevert, majd folyadék súrlódási állapotba alakul át. A löket középponti helyzetétől ez a folyamat megfordul, folyadék

állapotból alakul át kevertté, majd határréteggé. Ezen súrlódási állapot átalakulási folyamat minden ciklusban megtörténik a folyamatos sebességváltozás miatt [26].

Minden egymáson elmozduló test esetén figyelembe kell venni a rendszer energia egyenlegét. Minden, relatív mozgást megvalósító rendszer valamilyen terhelésnek van kitéve, legyen szó akár mechanikai vagy hőterhelésről, amellyel valamilyen formában energia kerül a rendszerbe. Ezen energia a súrlódás során négy különböző folyamat révén hőenergiává alakul, mint ahogyan azt a 9. ábra is mutatja.

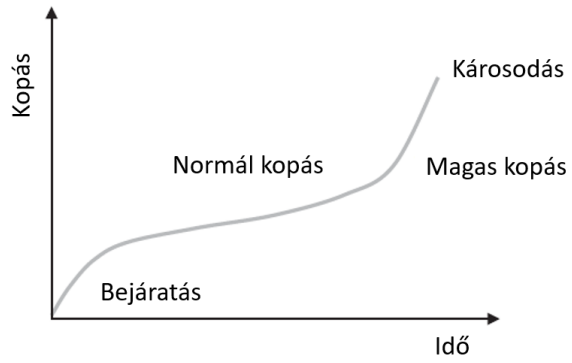
- **Adhézió:** az érintkező felületek között mikroszkopikus kapcsolatok alakulnak ki összehegedés formájában. Ezen összehegedés egyrészt energiaigényes folyamat, míg a rendszer további mozgatásához szintén energia szükséges.
- **Plasztikus deformáció:** az érintkező felületek egymást plasztikus deformációra kényszerítik, amely folyamat során a deformációhoz szükséges energia hőenergiává alakul.
- **Forgácsolás:** egy kiálló éles felületi hiba, vagy egy kemény szemcse a két súrlódó felület között egy különleges, forgácsolási megmunkáláshoz hasonlító folyamatot eredményez, amely során a keményebb anyag benyomódik a lágyabb anyagba, ott különféle barázdákat létrehozva. Ezen barázdák kialakulásához, illetve a keményebb anyag mozgatásához a lágyabb anyagban szintén energia szükséges, amely így hőenergiává változik.
- **Elasztikus deformáció és csillapítás:** a felületen nem csak plasztikus, hanem elasztikus deformáció is kialakulhat, amely maradó alakváltozással jár, tehát csak egy valamilyen csillapítással képes a deformálódott anyag az eredeti geometriáját visszanyerni. [25]



9. ábra: A súrlódási folyamat energiaáramlási formái ([25], szerzői módosítással)

A tribológiai rendszerek másik fontos kimeneti paramétere a kopás, amely apró anyagszemcsék mechanikai úton történő leválása az egymással kölcsönhatásban lévő testek súrlódó felületeiről [25]. A kopás egy természetes folyamat, amely ki nem küszöbölhető, azonban különböző mérnöki megoldásokkal a kopás mértéke egy megfelelően alacsony értéken tartható.

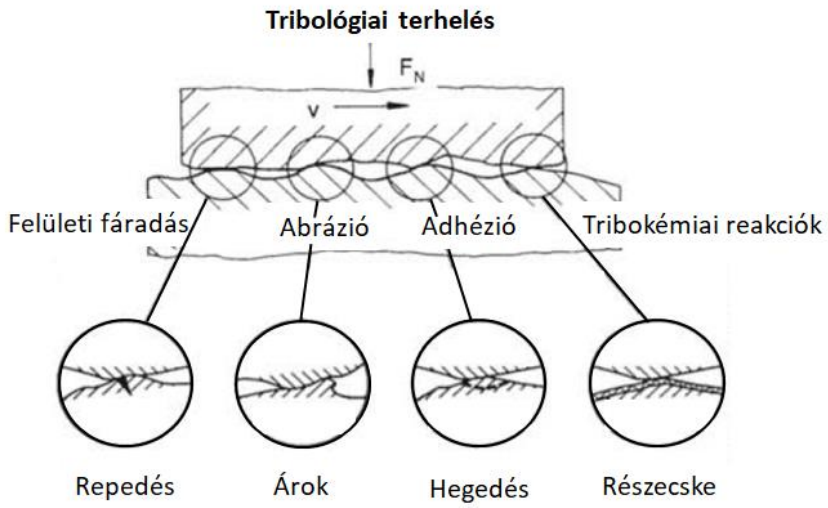
Egy tribológiai rendszer esetén a kopás időbeli eloszlása nem egyenletes, ahogyan azt a 10. ábra ismerteti. A mozgás indítása után mindig történik egy úgynevezett bejáratási folyamat, amely során az érintkező felületek összekopnak, a felületből kiálló érdességi csúcsok lekopnak. A bejáratási szakasz nagyon fontos és nem kihagyható az alkatrészek élettartama szempontjából: egy jól bejáratott rendszer a későbbiekben egy szinte elhanyagolható mennyiségű normál kopási szakaszt eredményez, amelyre a rendszer tervezhető. A normál kopást az idő előrehaladtával egy magas kopás, túlterhelés követi, amely során a kopás sebessége jelentősen növekszik, a későbbiekben pedig a rendszer végzetes károsodást szenved [24]. Egy mechanikai rendszer esetén a tervezők a legtöbb esetben előírják a bejáratás folyamatát, biztosítva a normál kopási szakasz megfelelőségét, illetve az alkatrész tervezése során a normál kopási szakaszban egy megfelelően alacsony kopássebességgel számolnak. A legtöbb esetben célszerű az elkopott alkatrészeket a magas kopási szakasz kezdeti stádiumában lecserélni, mint például a féktárcsa-fékbetét tribológiai rendszer esetében.



10. ábra: A kopás mennyiségének időbeli eloszlása ([24], szerzői módosítással)

A műszaki gyakorlatban, különösen fémes alkatrészek esetén a kopás mennyiségének időbeli eloszlása mellett a kopás fajtája is kiemelt fontosságú, hiszen a különböző kopási mechanizmusok ellen általában különböző megoldásokkal lehet védekezni [25]. Az egyes kopási mechanizmusokat a 11. ábra szemlélteti.

- **Felületi fáradásos kopás:** az egymással érintkező felületeken mikroszkópikus repedések jelennek meg annak hatására, hogy a felület a folyamatosan ismétlődő igénybevétel hatására elfárad. Ezek a repedések a további ismétlődő terhelések hatására képesek tovább terjedni, növekedni, amely eredményeként a repedések képesek összeérni és egy nagyobb szemcsét leválasztani a felületről.
- **Abráziós kopás:** az egymással érintkező felületeken vagy egy kemény kiálló felületi csúcs, vagy egy harmadik abrazív test hatására a mozgás irányával megegyező felületi karcolások, felületi kopási árkok jelennek meg. Az abráziós kopás mindig együtt jár a forgácsolás súrlódási mechanizmus jelenségével.
- **Adhéziós kopás:** az érintkező felületek a magas hőmérséklet és terhelés hatására mikroszkópikusan összehegednek, amelyeket a mozgás fenntartása érdekében fel kell szakítani. A keletkezett kötéseket az összehegedési síkban csak nagy erők hatására lehet felszakítani, a súrlódó testek közötti kötés könnyebben megszüntethető, ha a hegedési sík alatt, vagy felett, valamelyik testben szakad el az anyag. Ennek hatására anyag-áttevődés történik a két érintkező felület között.
- **Tribokémiai reakció:** az egymáson súrlódó felületek felszínén különböző kémiai reakciók játszódhatnak le (pl: felületi oxidáció), amelyek során egy kemény, de rideg réteg képződik az érintkező felületeken. Ezen rideg rétegben, illetve a réteg és az alapfém határán az eltérő anyagminőség és mechanikai tulajdonság miatt repedések alakulnak ki, amelyek összenövésével nagyobb szemcsék képesek leválni a felületről.



11. ábra: Az alapvető kopási mechanizmusok egyszerűsített ábrázolása ([25], szerzői módosítással)

3.1.2. Kenőolajok súrlódásra és kopásra gyakorolt tulajdonságai

Egy mechanikai rendszer, különösképpen egy belsőégésű motor működéséhez elengedhetetlen a kenőanyagok alkalmazása. A kenőanyagok lehetnek folyadékok, zsírok vagy szilárd halmazállapotúak, amelyek elsődlegesen a kent rendszer igényeitől, illetve annak tömítéseitől függenek. Mivel a kenőzsír jelentősen kisebb mértékben képes csak részt venni a hőháztartásban, egy belsőégésű motor esetében kizárólag kenőolajokat alkalmazunk, amelyek szerepe elsődlegesen a kenési feladatok mellett a hőháztartás támogatása, illetve a tisztítás.

A modern kenőolajok két fő részegységből épülnek fel: bázisolajból és adalékokból. A tiszta bázisolaj tribológiai és egyéb tulajdonságai nem felelnek meg egy komplex mechanikai rendszer követelményeinek, azonban ezen tulajdonságok különböző hozzáadott anyagokkal, adalékokkal javíthatók. A modern motorolajokban az adalékok aránya 30-40% is lehet [23].

A bázisolajok az API (American Petroleum Institute) osztályzása alapján 5 különböző csoportba (Group I – Group V) oszthatók [23], amely osztályozási rendszer alapja a kémiai összetétel. Az I. – III. csoportba a fosszilis, természetes alapú bázisolajok, míg a IV. – V. csoportba a szintetikus, mesterséges úton előállított bázisolajok tartoznak. Az egyes csoportokat és a szabvány szerinti követelményeiket a 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat: Bázisolajok API-szerinti csoportosítása és csoportosítási határértékek [23]

API csoport	Típus	Kéntartalom [m/m %]		Telített szén-hidrogének [m/m%]	Viszkozitás index [-]
Group I	Ásványi	>0,03	és/vagy	<90	80-119
Group II	Hidrogénezett ásványi	<0,03	és	>90	80-119
Group III	Hidrokrakkolt	<0,03	és	>90	>120
Group IV	PAO – Poli-alfa-olefin				
Group V	Észterek, egyéb szintetikus bázisolajok (PAG)				

A bázisolajok elsődleges feladatai a kenés biztosítása, oldószer az adalékokhoz, hőközvetítő közeg, tisztító ágens, illetve megfelelő folyási tulajdonsággal is kell rendelkezniük. A bázisolajok egyes tulajdonságai adalékokkal módosíthatók, azonban ennek a módosításnak is vannak korlátjai, ezért a bázisolaj kiemelt fontosságú.

A bázisolajok, és ezáltal a kész motorolajok egyik legfontosabb tulajdonsága a viszkozitás. A viszkozitás a folyadékok mozgással szembeni ellenállása, tehát a folyadékban, a folyadék molekulák között mozgás hatására kialakuló súrlódás [23]. A viszkozitás elsősorban az úgynevezett dinamikai viszkozitással jellemezhető, amely a 3.4. egyenlet segítségével számítható.

$$S = \frac{dv}{dy} \left[\frac{1}{s}\right] \tag{3.3}$$

$$\eta = \frac{\tau}{S} \left[\frac{kg}{m \cdot s}\right] \tag{3.4}$$

ahol S a folyadék rétegek közötti sebességkülönbség, v a folyadék áramlási sebessége, y a folyadékrészecske faltól mért távolsága, η a dinamikus viszkozitás és τ a nyíró feszültség az egymáson elmozduló folyadék rétegek között [27].

A dinamikai viszkozitás legnagyobb hátrányaként említhető, hogy direkt módon nem mérhető. Ezen hátrány kiküszöbölésére jött létre a kinematikai viszkozitás fogalma, amely a dinamikai viszkozitás és a sűrűség hányadosával számítható, ahogyan azt a 3.5. egyenlet is ismerteti. A kinematikai viszkozitás egyszerűen, kapilláris elven mérhető és a legtöbb viszkozitásmérő berendezés képes folyadékminta sűrűségmérésére is (pl: Anton Paar SVM

301 kinematikus viszkoziméter, ISO 23581 szabvány alapján [28]). A mért értékek alapján a dinamikai viszkozitás számítható.

$$\nu = \frac{\eta}{\varrho}\left[\frac{m^2}{s}\right] \tag{3.5}$$

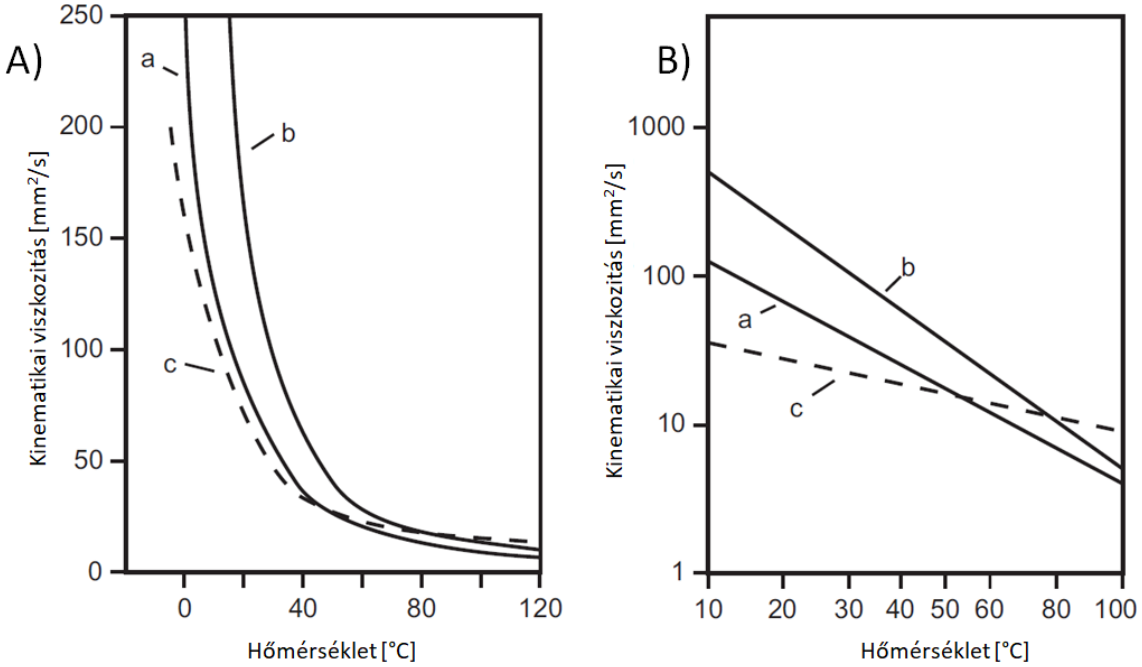
ahol ν a kinematikai viszkozitás, η a dinamikai viszkozitás és ρ a sűrűség [27].

A viszkozitás, mint fizikai mértékegység nem egy állandó mennyiség, értéke erősen függ a közeg hőmérsékletétől [23], amelyet motorolajok esetén a jelenleg érvényben lévő nemzetközi szabvány szerint [28] 40°C-on és 100°C-on szükséges mérni.

A viszkozitás hőmérsékletfüggése általában dupla logaritmikus skálán ábrázolt a könnyebb láthatóság érdekében, amelyet a 12. ábra is szemléltet. Az ábrán megfigyelhető, hogy dupla logaritmikus megjelenítés esetén a görbe kiegyenesedik és ezáltal értelmezhetők a görbe meredekségei. Az Ubbelohde-Walter egyenlet alapján a meredekség számítható [23]:

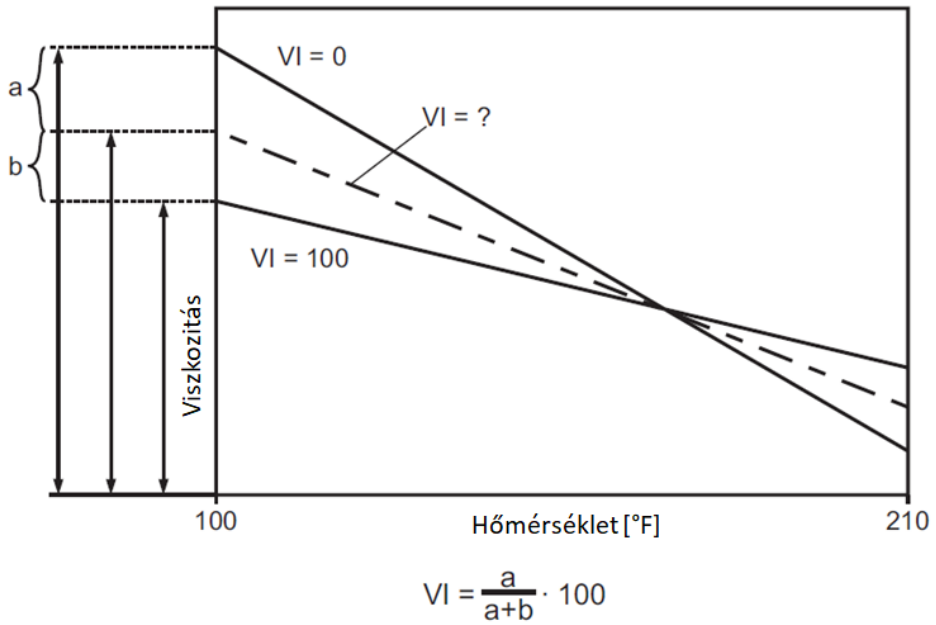
$$lglg\,(\nu + C) = K - m \cdot \lg T \tag{3.6}$$

ahol C és K konstans értékek, T a hőmérséklet Kelvin mértékegységben, m pedig a dupla logaritmikus skálán ábrázolt viszkozitás-hőmérséklet görbe meredeksége. A 12. ábra egyértelműen mutatja, hogy az ábrázolt három olajminta viszkozitásának más az m értéke.



12. ábra: Viszkozitás hőmérsékletfüggése három különböző folyadékminta esetében, a) parafinos bázisolaj, b) naftán bázisolaj, c) repceolaj ([23], szerzői módosítással)

A kenőolajok esetén az *m* meredekség helyett a viszkozitási index (*VI*) egy gyakrabban használt mennyiség. A viszkozitási indexet 1928-ban találták ki az Amerikai Egyesült Államokban, a viszkozitási index meghatározásának alapja az amerikai bázisolajok legalacsonyabb (VI = 0) és legmagasabb (VI = 100) értékei. A viszkozitási index értelmezését grafikusan szemlélteti a 13. ábra [23].



13. ábra: A viszkozitási index grafikai ábrázolása ([23], szerzői módosítással)

A viszkozitási index a következőképpen számítható [27]:

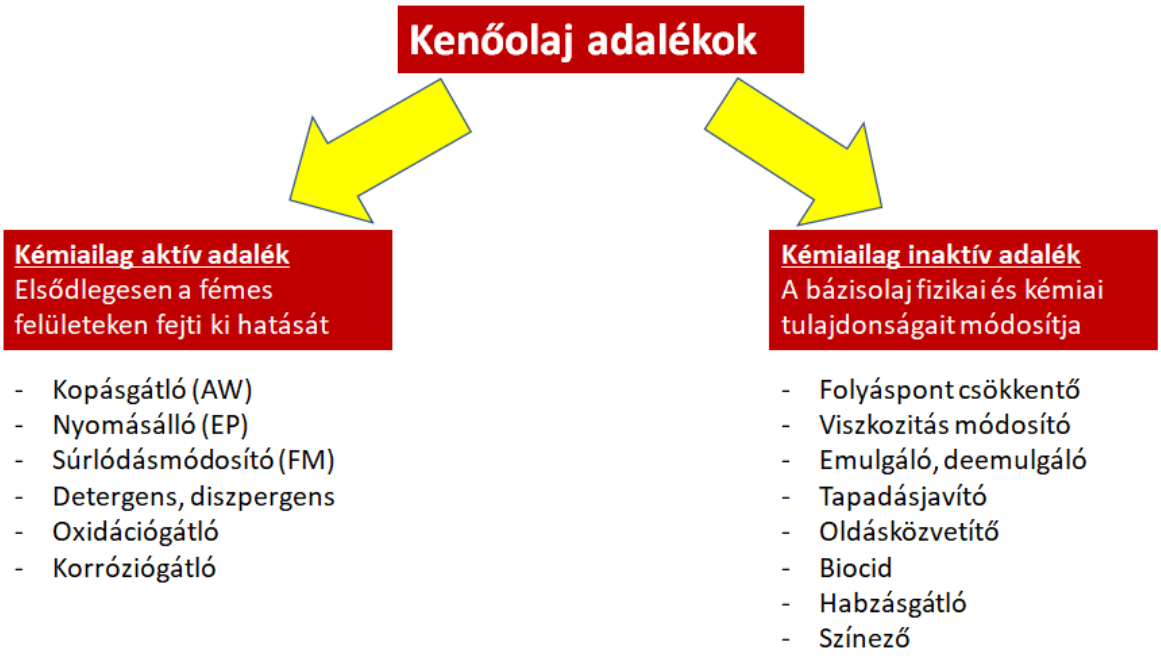
$$VI = \frac{L-U}{L-H} \cdot 100 \text{ [-]} \tag{3.7}$$

ahol:

- *VI*: a viszkozitási index
- *U*: a vizsgált kenőolaj kinematikai viszkozitása mm^2/s-ben 37,78°C (100°F) hőmérsékleten
- *L*: annak az alapul vett kenőolajnak a 37,78°C-ra vonatkozó viszkozitása, melynek 98,89°C-on (210°F) mért viszkozitása egyenlő a vizsgált kenőolaj viszkozitásával és viszkozitási indexe 0
- *H*: annak az alapul vett kenőolajnak a 37,78°C-ra vonatkozó viszkozitása, melynek 98,89°C-on mért viszkozitása egyenlő a vizsgált kenőolaj viszkozitásával és viszkozitási indexe 100.

Egy mai, modern szériaérett motorolajban számos, különböző hatást kiváltó adalék található (14. ábra), amelyek típusa, feladatköre és mennyisége hosszú és alapos kutatások elvégzése után került megállapításra. Az adalékok elsődleges feladata a motorolaj egy adott tulajdonságának valamely irányban történő megváltoztatása, vagy akár egy teljesen új tulajdonságot is adhat a kenőolajnak [23].

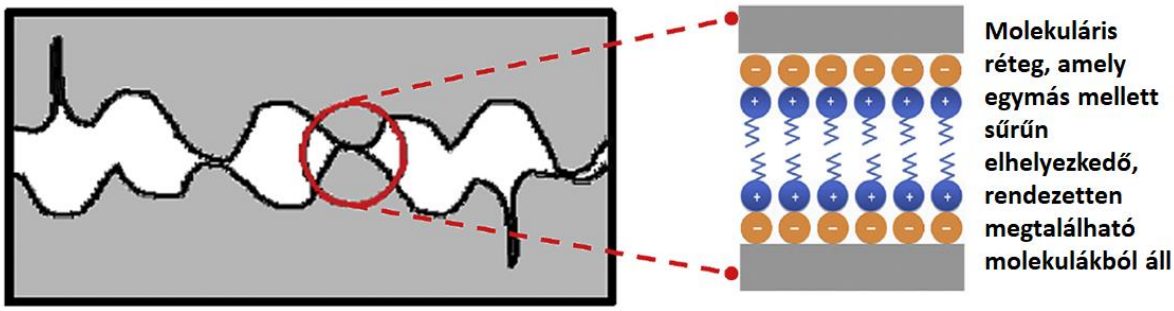
Az adalékok két fő kategóriába sorolhatók: aktív adalékok, amelyek a fémes felületeken fejtik ki tulajdonságaikat (pl: súrlódáscsökkentés, kopásvédelem), és az inaktív adalékok, amelyek a kenőolaj fizikai vagy kémiai tulajdonságait módosítják (pl: viszkozitásmódosító, oxidáció stabilitás javító). Egyes adalékok számára elegendő néhány ppm-es koncentráció, más adalékoknak 20 tömegszázalékos koncentrációra is szükségük lehet a hatásuk megfelelő kifejtése érdekében. Az adalékok közül az egyik legfontosabb a habzásgátló adalék, amely csökkenti a kenőolaj mozgása során keletkező légbuborékokat, amelyek károsíthatják a különböző súrlódó alkatrészeket.



14. ábra: Kenőolaj adalékok csoportosítása ([23], szerzői kiegészítéssel)

Jelen doktori értekezés tartalmi korlátjai nem teszik lehetővé minden adaléktípus vizsgálatát. A doktori értekezésben vizsgált adalékok elsősorban a tribológiai rendszerek súrlódási és kopási tulajdonságait hivatottak módosítani, javítani, ennek okán a továbbiakban ezen adalék típusok kerülnek részletes bemutatásra.

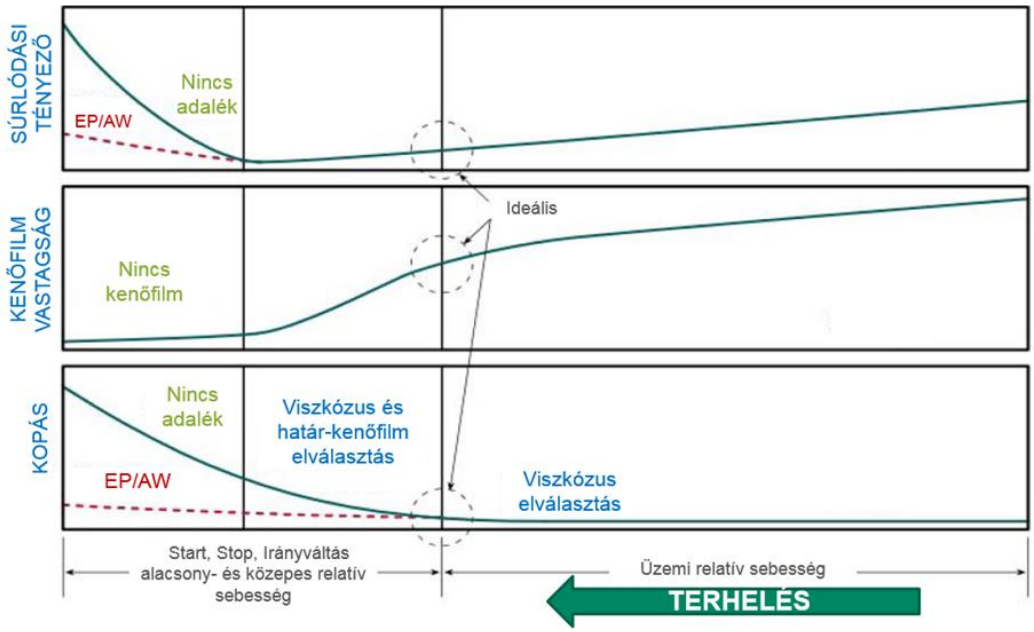
A kopásgátló és nyomásálló (AW és EP) adalékok elsődlegesen az úgynevezett polaritáskülönbség elve alapján működnek, ami azt jelenti, hogy az adalék és a fémfelület polaritásának eltérése miatt természetesen vonzzák egymást és meg is tudnak tapadni a felületen adszorpció vagy kemiszorpció útján (Bowden-Taylor féle határréteg modell, lásd: 15. ábra [29]). Ezen folyamat eredményeképp egy olyan molekuláris védőréteg keletkezik a fémes alkatrészek felületén, amely akár határréteg kenési állapotban is képes meggátolni a fémes direkt érintkezést, jelentősen csökkentve a felületek mikroösszehegedés útján történő kopását. Az egyik leggyakrabban használt kopáscsökkentő adalék a cink-dialkil-ditiofoszfát (ZDDP vagy ZnDTP). A ZDDP adalék egy nagyon jó tribológiai tulajdonságú molekuláris védőréteget képez a fémes kontaktfelületeken [30-32], és emellett olcsón gyártható és beszerezhető anyag. Legnagyobb hátránya azonban, hogy cinket tartalmaz és a cink a hengerfalon történő elégése során olyan égésterméket eredményez, amely hamut képez eltömítve a modern személygépjárművekben található részecskeszűrőket. Az ilyen fémes anyagokból képződött hamu tovább nem égethető, ezáltal a részecskeszűrő nem regenerálható. A cink tartalmú kopásgátló adalékok kiváltására fejlesztették ki a foszforsav-észter nevet viselő adalékot [23], amely égése során nem keletkezik hamu, nem károsítja a részecskeszűrőt. Hátrányaként említhető, hogy kevésbé hatékony, illetve gyártása költségesebb, mint a ZDDP-nek. További hasonló anyagként megemlítendő a molibdén-dialkil-ditiofoszfát, amely szintén kiváló kopáscsökkentő tulajdonságokkal rendelkezik, azonban toxikus hatásai miatt a mai kenőolajokban egyáltalán nem alkalmazzák.



15. ábra: A Bowden-Taylor féle határréteg modell ([29], szerzői módosítással)

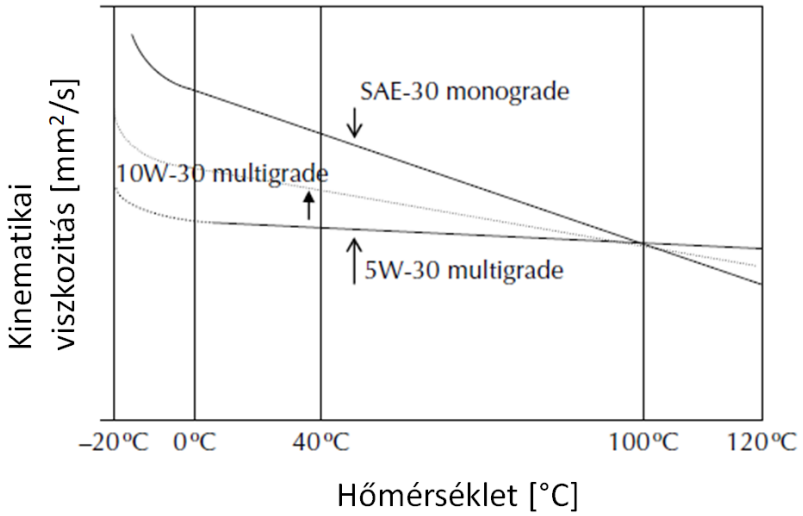
Folyadék súrlódási állapot esetén a súrlódást csak és kizárólag a súrlódó felületek közötti köztes közeg súrlódási tulajdonságainak javításával lehet csökkenteni, például a közeg viszkozitásának csökkentésével. Azonban nem minden esetben biztosítható ezen folyadék súrlódási állapot, és ez esetekben szükséges olyan adalékok használata, amelyek csökkentik a súrlódási veszteségeket az ilyen üzemállapotokban azáltal, hogy megakadályozzák a stick-slip (két egymáson elmozduló elem mozgása során spontán módon fellépő rángatózó mozgás [25]) rezgéseket, amelyek eredményeként az üzemelő rendszerünk által kibocsátott zajszint is csökkenthető. Ezek az adalékok elsődlegesen olyan hőmérsékleten működnek, amelyeken a kopásgátló és nyomásálló adalékok még nem üzemképesek. A súrlódásmódosító adalékok vékony egymolekula vastagságú védőréteget képeznek a súrlódó felületeken, így segítve az alkatrészek egymáson való elmozdulásakor keletkező súrlódási veszteségeket. Ezek alapján a súrlódásmódosító adalékokat nevezhetjük akár olyan gyengébb kopásgátló vagy nyomásálló adalékoknak is, amelyek alacsonyabb hőmérsékleten üzemképesek és megfelelő védelmet biztosítanak a kevert súrlódási állapot kezdeti állapotában. Súrlódásmódosító adalékok lehetnek molibdén, grafit, foszfor vagy teflon alapú anyagok, mint például a foszforsav észter [23].

A kenőanyagok a bennük található adalékokkal együtt jelentősen képesek megváltoztatni egy tribológiai rendszer viselkedését. Egy adalékolatlan bázisolaj esetén csak az olaj folyási tulajdonságaitól, tehát a viszkozitásától függ az, hogy milyen tribológiai veszteségekkel fog üzemelni a vizsgált rendszerünk. Ezzel szemben egy erősen adalékolt kenőolaj esetében a határréteg- és kevert súrlódási állapotokban a különböző aktív adalékok (súrlódásmódosító, kopásgátló, magas nyomásnak ellenálló adalék) jelentősen képesek csökkenteni a súrlódási tényezőt, illetve a keletkezett kopás mennyiségét, ahogyan a 16. ábra is szemlélteti. A felületaktív kenőolaj adalékok polaritás-különbség elve alapján képesek megtapadni a fémes alkatrészek felületén, beépülnek a felület külső nanométeres tartományába és ott fejtik ki jótékony hatásait akkor is, ha valamilyen okból nincs meg a megfelelő kenőolaj réteg a két felület között [23-24].



16. ábra: Súrlódási együttható (Stribeck-görbe), kenőfilm vastagság és kopás a fellépő relatív sebesség függvényében ([33], szerzői módosításával)

A kenőolajok további szabványos csoportosítását az SAE J300-as szabvány alapján lehet elvégezni. Ezek alapján léteznek úgynevezett téli kenőolajok (W-jelzéssel ellátott) és nyári kenőolajok (külön jelzés nélküli). A mai személygépjárművekben úgynevezett többfokozatú (multigrade) olajokat használnak, amelyek alacsony hőmérsékleten úgy viselkednek, mint egy téli olaj, míg üzemi körülmények között úgy, mint egy nyári olaj (pl: SAE 5W-30). Ezeket szintén az SAE J300-as szabvány szabályozza. A 17. ábra ismerteti a kinematikai viszkozitás hőmérsékletfüggését különböző SAE olajtípusok esetén.



17. ábra: Viszkozitás hőmérsékletfüggése különböző SAE olajtípusok esetén ([34], szerzői módosításával)

3.2. Kenőolajok fejlesztési irányelvei

A mai modern kenőolajok fejlesztése egy olyan folyamat, amely időtartama mindig hosszú, illetve folyamatosságot igényel: a modern kémiai kutatások folyamatosan új anyagokat, molekulákat eredményeznek, amelyek alkalmasak lehetnek valamilyen kenőolajban történő alkalmazásra. A kenőolajok fejlesztése azonban nem csak kémiai folyamat, a mechanikai és termikus hatások ugyanúgy jelentős fontossággal bírnak.

A jelenlegi kenőolaj fejlesztések és kutatások három fő irányvonalat követnek: a használt kenőolaj viszkozitásának és viszkozitási indexének csökkentése, új kenőolaj-adalékok fejlesztése, illetve a kutatási fázisban lévő új kenőfolyadékok vizsgálata (pl: ionos folyadékok – ionic liquids – IL) témakör. Az egyes fejlesztési irányelvek a következő alfejezetekben részletesen is kifejtésre kerülnek.

Jelen doktori értekezés terjedelmi korlátjai nem teszik lehetővé az összes, olajokkal kapcsolatos fejlesztési folyamat ismertetését és vizsgálatát, ezért a továbbiakban elsősorban a disszertáció témáját adó kenőolaj-adalékokra, illetve a modern autóiparban megjelenő fejlesztési irányzatokra helyezek nagyobb hangsúly.

3.2.1. Kenőolajok viszkozitásának csökkenése

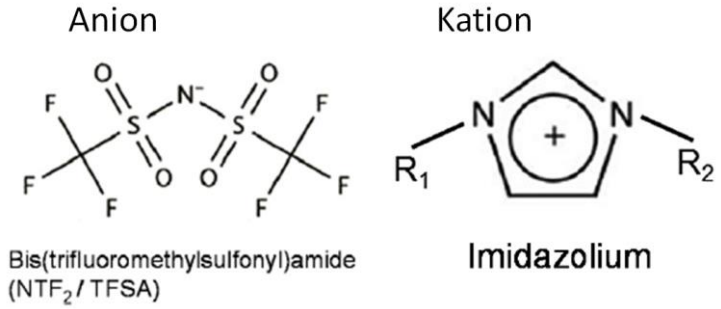
A modern autóiparban használt kenőolajok egyik leginkább fejlődő ágazata a viszkozitás területe, azon belül a szabványos viszkozitási osztály csökkenése. Manapság a legtöbb autógyártó a motorok számára SAE 0W-20-as, vagy SAE 0W-30-as viszkozitási osztályú kenőolajat ír elő attól függően, hogy benzin, vagy dízel üzemű erőforrásról van-e szó. Azonban a fejlesztés itt még nem áll meg: a legtöbb olajgyártónál kísérleti fázisban vannak az ennél alacsonyabb viszkozitási osztályú kenőolajok, mint például az SAE 0W-16 vagy az SAE 0W-12 [35]. Az SAE 0W-8-as viszkozitási osztályú kenőolaj ugyancsak fejlesztés alatt áll. Misaki és társai [36] által elvégzett kutatások bizonyítják, hogy az általuk kifejlesztett 0W-8-as motorolaj 0,8%-kal kevesebb üzemanyagot használ fel, összehasonlítva egy hagyományosabb 0W-16-os motorolajjal. A nagyon alacsony viszkozitásnak jelentős előnyei lehetnek a súrlódási veszteségek csökkentésében, amely közvetlenül hatással van az üzemanyag fogyasztásra, azonban az alacsony viszkozitás vékonyabb olajfilm réteget képez az egymáson elmozduló súrlódó felületeken, ezáltal csökkentve a motorolaj által biztosított kopásvédelmet. Ezen kihívást a folyóiratcikk szerzői olyan extra adalékok hozzáadásával oldották meg (kalcium-borát és molibdén-ditiokarbamát), amely által az olaj viszkozitásának növekedése nélkül is képes vastagabb olajfilmet képezni a fémes felületeken.

Az alacsonyabb viszkozitási osztályú kenőolajok vékonyabb olajfilmet tudnak csak képezni az érintkező testek felületein, amely a rendszert leíró Stribeck-görbét úgy módosítja, hogy a működési tartomány nagyobb arányban lesz a határréteg és a kevert súrlódási állapotának tartományában (lásd: 16. ábra). Ezen tartományokban magasabb kopási veszteségekkel kell számolni, amely az alkatrészek élettartamának rövidülését eredményezi. Azért, hogy a megnövekedett kopást mégis egy elfogadhatóan alacsony szinten tartsák, különböző, jellemzően felületaktív kopásgátló adalékot kell szerves módon és nagyobb arányban beépíteni a kenőolajba (pl: ZDDP, MoDTC stb.) [36].

3.2.2. Ionos folyadékok

Egy másik fejlesztési terület az úgynevezett ionos folyadékok témaköre. Az ionos folyadékok alacsony olvadási hőmérséklettel rendelkező anyagok (általában szerves só), amelyeknek különleges karakterisztikájuk van, mint a széles viszkozitási tartomány, alacsony gőznyomás, alacsony illékonyság, kitűnő hőstabilitás, a jó keveredési hajlam más szerves vegyületekkel és magas hőmérsékleten ég el [29].

Az ionos folyadékok definíció szerint olyan vegyületek, amelyek csak olyan ionokat tartalmaznak, amelyeknek egy vagy több ionja szerves fajtájú. Ezen ionok lehetnek akár pozitív, akár negatív töltésűek. Az ionos folyadékok lehetnek kationos, illetve anionos struktúrájúak, amelyre példákat a 18. ábra mutat [29].



18. ábra: Ionos folyadékok anionos és kationos struktúrájának példája ([29], szerzői módosításával)

Kenőolajként történő alkalmazhatóságáról megállapítható, hogy a legfontosabb paramétereiben teljes mértékben megfelel a mai korszerű motorokban használt olajokénak [29]:

- sűrűségük mindig magasabb, mint az ásványi olajoké, mivel hosszú és szimmetrikus molekuláris szerkezetűek
- viszkozitásukban és viszkozitási indexükben nincs jelentős eltérés a hagyományos szintetikus kenőolajokhoz képest
- kenőképességük vizsgálata során megállapítható, hogy sok féle fémes felület esetén képesek megfelelő kenést biztosítani a tribológiai rendszer számára

Az ionos folyadékok használhatók akár bázisolajként, akár adalékanyagként különböző olajokban. Különböző kutatók ígéretes tribológiai tulajdonságokat tártak fel kutatási munkájuk során, amelyek arra utalnak, hogy az ionos folyadék képes lehet felváltani a jövőben a hagyományos kenőolajokat. Ezen megállapítások elsősorban annak köszönhetők, hogy különleges, egyedi tulajdonságokkal rendelkeznek.

Anand és társai [37] két különböző ionos folyadékkal adalékolt bázis- és szériaolajat hasonlítottak össze különböző olajmintákkal. A tribológiai vizsgálatokhoz egy szériában is használt dugattyúgyűrű próbatestet járattak öntöttvas síkfelületen és közben folyamatosan rögzítették a súrlódási együtthatót. Ezek alapján megállapították, hogy a 6%-ban ionos folyadékkal adalékolt olajminta javította a vizsgált rendszer súrlódási és kopási tulajdonságait.

Ezek alapján megállapítható, hogy az ionos folyadékok a jövőben képesek lehetnek alternatív kenőanyagként vagy adalékként szolgálni a belsőégésű motorokban, ezáltal javítva a járművek fogyasztását és csökkentve a környezetre gyakorolt káros hatásait.

3.2.3. Új generációs kenőolaj adalékok

A mai kenőolaj-fejlesztés egyik leginkább fejlődő ágazata az új típusú, új anyagminőségű adalékanyagok területe. Mint minden más területen, a kenőanyagok esetén is folyamatosan keresik azokat az anyagokat, amelyek az adott felhasználásra jobban megfelelhetnek, mint a korábban használt anyagok. A személygépjárművekbe szánt motorolajok esetén a jelenlegi emissziós normáknak megfelelően az egyik jelentős fejlesztési irány az olyan anyagot tartalmazó molekulák kiváltása, amelyek károsíthatják a kipufogógáz utókezelő rendszereket vagy csökkenthetik azok hatékonyságát.

A kenőolaj adalékok lehetnek folyékony vagy szilárd halmazállapotúak is. A folyékony halmazállapot esetén képes oldódni a kenőolajban vagy annak oldássegítő adalékaiban, míg a szilárd halmazállapotú anyag (pl: kerámia szemcse) homogén eloszlásban található meg a folyadékban [38-39].

Az adalékok méreteiket tekintve különbözők lehetnek. Általánosságban elmondhatók, hogy az adalékok átlagos méretei a mikro (0,1–10 μm) vagy a nano (1–100 nm) tartományba tartoznak, mivel az adalékok ezekben a tartományokban képesek kifejteni jótékony tulajdonságaikat a mai precízen megmunkált fémes érintkező felületek jelenléte mellett [40]. Jelenleg a nanoméretű tartomány a leginkább kutatott.

Sokféle adalékanyag áll jelenleg kutatás-fejlesztés tevékenység alatt, azonban az egyik legjelentősebb és leginkább kutatott terület a kvázi gömb formájú, nanoméretű kerámiaszemcsék alkalmazása (lásd: 4. fejezet). Ezen kívül további anyagminőségeket is folyamatosan vizsgálnak: molibdén-ditiokarbamát (MoDTC [41-44]), politetrafluoretilén (teflon – PTFE [45]), szénmódosulatok (grafén [46], fullerén [47]) vagy nanoméretű elemi anyagok (réz [48-49]).

Az újgenerációs kenőolaj adalékok különböző szerepeket tölthetnek be a működésük során: csökkenthetik a mozgás során keletkező súrlódási veszteségeket, csökkentik a berendezés üzemeltetése során kialakuló fémes érintkezések arányát azáltal, hogy védőréteget képeznek a felületen, csökkenthetik a keletkező kopást, segítik a mozgás során kialakuló terhelések egyenletes elosztását a felületen stb.

3.3. Kenőolajok vizsgálatainak módszerei

A kenőanyagok vizsgálatának lehetőségei széleskörűek: léteznek egyszerűbb és bonyolultabb berendezések, amelyek használhatók. A fellelhető vizsgálati technikákat 6 különböző tribológiai vizsgálati kategóriába lehet csoportosítani (19. ábra) [25]:

I. **Üzemi vizsgálat:** a vizsgálandó rendszert valóságos felépítményben valóságos körülmények között vizsgáljuk, pl: kipufogógáz-elemzés valós utakon.

II. **Fékpadi vizsgálatok:** az üzemi vizsgálatok során fellépő legjelentősebb zavaró körülményt, a környezeti tényezőket zárjuk ki az által, hogy ellenőrzött laborkörülmények között végezhetők el a vizsgálatok, pl: görgős fékpadi autóvizsgálatok, égéses üzemű motorfékpadi vizsgálatok.

III. **Alkatrészcsoport vizsgálat:** a vizsgálandó rendszer egyszerűsödik, ezáltal a vizsgálatok költségei is csökkennek, pl: belsőégésű motorok súrlódásvizsgálata külső elektromos hajtással, váltómű-vizsgálat.

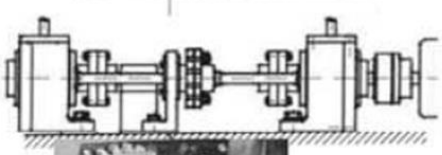
IV. **Alkatrész-vizsgálat:** két vagy több, egymáson elmozduló valóságos alkatrész tulajdonságai vizsgálhatók ezen a szinten megfelelő célgép segítségével, pl: fogaskerékpár egymáson való elmozdulása.

V. **Próbatest vizsgálat:** a vizsgálandó alkatrészekből kimunkált kisebb testek, amelyeket egy speciális célgép, tribométer segítségével egymáson mozgatva a fellépő tribológiai alaptulajdonságok (súrlódási veszteség, kopás, kenés) mérhetők, pl: hengerfal és dugattyúgyűrű próbatestek között fellépő súrlódás és kopás vizsgálata.

VI. **Modell vizsgálat:** a vizsgálandó alkatrészekhez geometriailag nem hasonlító, azonban azokkal megegyező anyagminőségű, felületi minőségű elemi vizsgálati próbatestek egymáson való mozgatása, pl: kenőanyag kenési tulajdonságainak vizsgálata golyó-tárcsa rendszerben.

A vizsgálati kategóriák esetén megállapítható, hogy a vizsgálandó rendszer egyszerűsödésével csökkennek a vizsgálatok elvégzésének költségei, illetve a kevesebb zavaró tényező miatt a megismételhetőség is javul, azonban a valósághűség egyértelműen romlik. A megfelelő vizsgálati berendezés és kategória használata azonban segíthet a pontosabb eredmények elérése érdekében. Jó példaként megemlíthető, hogy egy új anyagminőség elemzése során elengedhetetlenek olyan szelektáló, olcsó vizsgálatok elvégzése, amelyek képesek kiszűrni a teljes mértékben alkalmatlan variációkat és így csak az ígéretesnek tűnő variációkkal végzik el a drágább, azonban valósághűbb vizsgálatokat.

Természetesen léteznek különböző szimulációs lehetőségek is, amelyekkel súrlódási veszteségeket, reológiai tulajdonságokat, vagy akár siklócsapágyaknál fellépő nyomáseloszlást is lehet szimulálni.

Kategória	Méréstechnika		Rendszer, felépítmény, modell
I	Üzemi és hozzá hasonló vizsgálatok: Eredeti rendszer-struktúra, terhelések egyszerűsítve	Üzemi vizsgálat	
II		Fékpadi vizsgálat	
III		Alkatrészcsoport vizsgálat	
IV		Alkatrész vizsgálat	
V	Modell-struktúra és egyszerűsített terhelés	Próbatest vizsgálat	
VI		Modell vizsgálat	

19. ábra: Tribológiai vizsgálati szintek és vizsgálati technikák ([25], szerzői módosítással)

Az irodalmi források alapján megállapítható, hogy az újfajta kenőolajok tribológiai vizsgálataihoz a világ kutatói hasonló vizsgálati folyamatokat követnek és a módszertan is sok esetben azonos:

- Vizsgálandó kenőanyag-minta előkészítése: a vizsgálandó adalékokat por vagy folyadék formájában hozzá kell keverni a használt olajhoz,
- Olajminta homogenitásának, illetve reológiai tulajdonságainak elemzése: részecskeméret eloszlás vizsgálat, kinematikai viszkozitás, illetve viszkozitási index elemzés,
- Tribológiai vizsgálatok elvégzése, súrlódási együttható adatrögzítéssel,
- Vizsgálati próbatesteken jelentkező kopás számszerűsítése, kopáskép elemzése különböző működésű és felbontású mikroszkópok segítségével.

A további alfejezetekben az egyes lépéseknél leggyakrabban használt technikák részletesebben is kifejtésre kerülnek.

3.3.1. Kenőolaj minta előkészítése

A legtöbb tribológiai vizsgálat, így a kenőolaj adalékok vizsgálatának is a legfontosabb folyamata magához a kenőolaj mintához köthető: magát a kenőolaj mintát megfelelően elő kell készíteni. Az előkészítés két fontos feladatot lát el: az adalékok folyadékban való homogén eloszlatását, illetve szilárd halmazállapotú adalékrészecskék esetén a túl nagyméretű agglomerátumok képződésének megakadályozását. Inhomogén adalékeloszlás esetén az egyes olajrészek más és más hatásokat fognak kifejteni, így zavarva a pontos mérési eredményeket. A nagyméretű agglomerátumok jelentősen más folyamatok szerint működnek, mint a kisebbek: a nagyobb szemcsék erősítik a három-test abráziós kopást és a vele járó súrlódási veszteségeket. Peña-Parás és társai [40] bebizonyították, hogy a kenőolajba kevert nanoadalékok csak abban az esetben képesek kedvező tribológiai tulajdonságokat kifejteni, amennyiben a bekevert olajmintában található nanorészecske-agglomerátumok átlagos mérete kisebb, mint az érintkező fémes felületek átlagos felületi érdessége. Illetve azt is bebizonyították, hogy a nagyon alacsony átlagos szemcseméretű nanorészecskék sokkal nagyobb agglomerátumokat képesek alkotni, a köztük fellépő másodlagos Van der Waals-kötések hatására. A kenőolajban található szilárd szemcsék agglomerátumának mérete legkönnyebben a bekeverési folyamattal szabályozható, illetve léteznek olyan felületaktív segédanyagok (pl: olajsav, triton), amelyeket hozzáadva az olajmintához az agglomerátumok mérete csökkenthető.

A kutatók a fellelhető irodalmi forrásokban általában két fő berendezést használnak az olajmintáik bekeveréséhez és homogenizálásához: ultrahangos homogenizálót [40], illetve valamilyen keverő berendezést [50-52]. Az ultrahangos homogenizáló (20. ábra, bal) egy olyan berendezés, amely magas frekvenciájú ultrahangokat képez az olajmintában, és ezek a rezgések fellazítják az egyes szemcséket, redukálják az agglomerátumok méretét úgy, hogy a fellazítás után a rezgés hatására a szemcsék közé olajmolekulák kerülnek, lelassítva a szemcsék újbóli összetapadását. A minták keveréséhez általában mágneses keverőt használnak (20. ábra, jobb): a felkeverendő mintába egy teflon bevonatú hengert, úgynevezett mágnesbabát helyeznek, amely mágneses mező hatására forgatható. A berendezéshez tartozik egy munkatér, amely folyamatosan változó irányú mágneses teret generál, így forgatva az olajminta lombikban található mágnesbabát. Legtöbb esetben mindkét berendezés használata során beállítható a hőmérséklet, mivel vannak olyan adalékok egy szériaérett motorolajban, amelyek megfelelő homogenizálása igényli az emelt hőmérsékletet és az azzal járó növelt energiaszintet.

20. ábra: Fischer Scientific GSA által gyártott ultrahangos homogenizáló [53] (balra) és Witec Labortechnic GmbH által forgalmazott MS-20D mágneses keverő [54] (jobbra)

A kutatók véleménye abban a kérdésben eltér, hogy milyen beállítások szükségesek a megfelelő homogenitási szint eléréséhez: mennyi ideig szükséges az olajmintát homogenizálni, illetve keverni, milyen frekvencia és hőmérséklet használandó, illetve hány lépcsős homogenizálás és keverés szükséges. Továbbiakban megemlítendő, hogy az ilyen homogenizálási folyamatokra nemzetközi szabvány sem létezik.

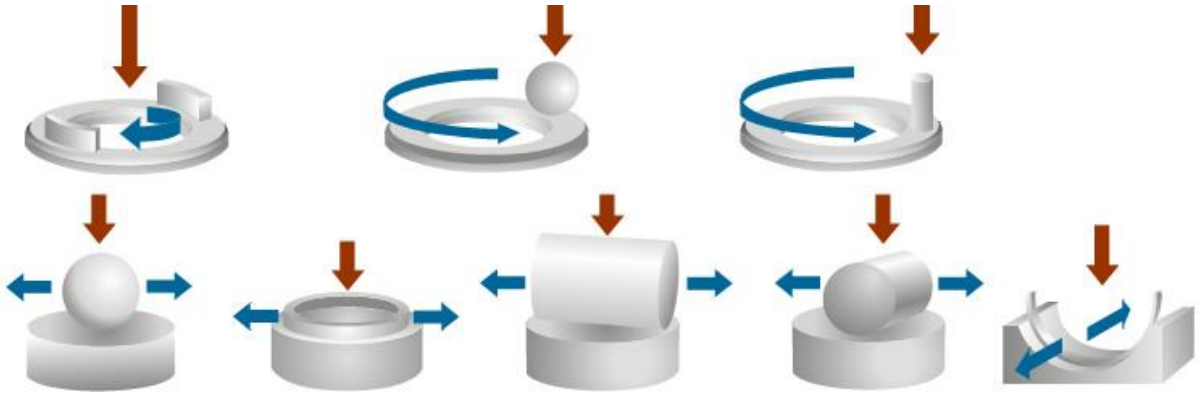
A homogenizálás után az elkészült olajminták tulajdonságai mérhetők. A kinematikai viszkozitás, illetve szériaolaj esetén a viszkozitásindex egy gyakran mért érték, hiszen a viszkozitás komoly befolyással bír a kenőolaj tribológiai tulajdonságaira. A kenőolaj minták viszkozitásának mérését ISO-norma szabályozza [28], amelyre különböző automatizáltságú mérőberendezések használhatók. Egy ilyen példa az Anton Paar által készített SVM 3001-es kinematikai viszkozitásmérő berendezés, másnéven viszkoziméter (21. ábra).

21. ábra: Anton Paar SVM 3001-es kinematikai viszkozitás mérő berendezés [55]

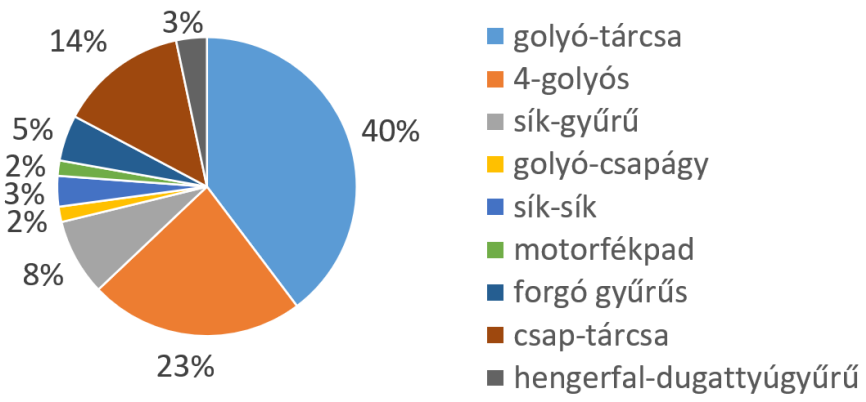
A nanokerámiával adalékolt kenőolaj minták esetén a képződött nanorészecske agglomerátumainak méretbeli eloszlása szintén fontos információ lehet. Az egyik legelterjedtebb részecskeméret elemző eljárás az úgynevezett dinamikus fényszórás (dynamic light scattering – DLS), amely használt szórt fény magas frekvenciás fluktuációját elemzi a folyadékban található részecskék felületén. A DLS elsősorban az egyes részecskék Brown-féle mozgását elemzi annak érdekében, hogy azok méretbeli eloszlását meghatározza. Az ilyen vizsgálatok elsődleges eredménye a részecskék intenzitásának súlyozott eloszlása, hidrodinamika-ekvivalens átmérőben [56]. DLS vizsgálati módszer felhasználásával Peña-Parás és társai [40] megállapították, hogy a nanorészecskék esetén egyértelműen megfigyelhető egy optimum átlagos szemcseméret, amely kenőolajba keverésekor a legalacsonyabb méretű agglomerátumok képződnek. A nagyon alacsony szemcseméret esetén a felerősödő másodlagos Van der Waals-erők hatására jobban összetapadnak a szemcsék, míg magas szemcseméret esetén a gyengébb összetapadás is nagyobb agglomerátumot képezhet.

3.3.2. Kenőolaj minták súrlódásvizsgálati lehetőségei

Az irodalomban fellelhető információk alapján megállapítható, hogy a különböző kutatók különböző vizsgálati próbatest-párosításokat használnak a vizsgálataik során. A próbatest-párosítások elsődleges csoportosítása a megvalósítható mozgásviszonyon alapul: leggyakrabban alternáló mozgást végző rendszereket használnak, azonban a forgó mozgást végző rendszerek is gyakoriak. A 22. ábra ismerteti a különböző próbatest-párosításokat, úgy, mint golyó-tárcsa, henger-tárcsa, csap-tárcsa, hengerfal-dugattyúgyűrű stb. A 23. ábra az irodalomban fellelhető, nanokerámia kenőolaj-adalékokkal foglalkozó publikációk számának százalékos eloszlását mutatja be, amelyből megállapítható, hogy a leggyakrabban használt rendszerek a golyó-tárcsa, illetve a 4-golyós vizsgálati rendszerek.



22. ábra: Különböző próbatest-párosítások tribológiai vizsgálatok elvégzésére [57]



23. ábra: Irodalomban fellelhető vizsgálati berendezések eloszlása ([58-62], szerzői kiegészítéssel)

Legtöbb esetben a kutatók kereskedelmi forgalomban beszerezhető vizsgáló berendezéseket használnak kutatásaikhoz, azonban a használt berendezések típusaiban jelentős eltérések találhatók. A kereskedelmi forgalomban beszerezhető berendezések közül az egyik leggyakrabban használt mérőeszköz az Optimol Instuments GmbH. által gyártott és forgalmazott SRV® (Schwing-Reib-Verschleiß – rezgés-súrlódás-kopás) sorozat egyik berendezése, amelyek közül általában az SRV®3, SRV®4, vagy SRV®5 berendezések a jellemzőek [63-64]. Az Optimol SRV® sorozat egyik legnagyobb előnye abban rejlik, hogy jelentős darabszámú berendezés található meg belőle a világon, tehát a vizsgálatok így könnyebben összehasonlíthatók. További előny, hogy a berendezésre közel 50 különböző nemzetközi vizsgálati szabvány létezik (pl: ISO 19291:2016, [65]). Egy másik tribométer gyártó cég, amelynek termékpalettája széles, és berendezéseit számos tanulmány használja, az a Phoenix Tribology Ltd. [66]. A Phoenix Tribology több különböző, TE sorozatszámmal ellátott tribométert kínál, különböző felhasználásokra. A TE sorozat felhasználásával számos tudományos munka került publikálásra, amelyek száma a gyártó honlapja alapján közel 1400. A Phoenix Tribology cég berendezéseihez is számos nemzetközi ASTM, DIN, illetve ISO szabvány tartozik (pl: ASTM D5707 – 19, [67]).

Nem ritkák az olyan tanulmányok sem, ahol a szerzők egyedi fejlesztésű mérőberendezéseket használnak. Ali és társai [59] saját készítésű vizsgálati berendezést használtak, amely egy 1,5 kW-os elektromotor segítségével egy egyhengeres belsőégésű motor főtengelyével alkalmazva hozza létre a szükséges alternáló mozgást, a vizsgálatokhoz pedig hengerfal és dugattyúgyűrű próbatesteket használnak.

A vizsgálati berendezések közös nevezője az, hogy mindegyik berendezés elsődleges célja a súrlódási veszteségek mérése és számszerűsítése, amelyet alternáló mozgás esetén erőmérő szenzorok, míg forgómozgás esetén nyomatékmérő tárcsák segítségével oldanak

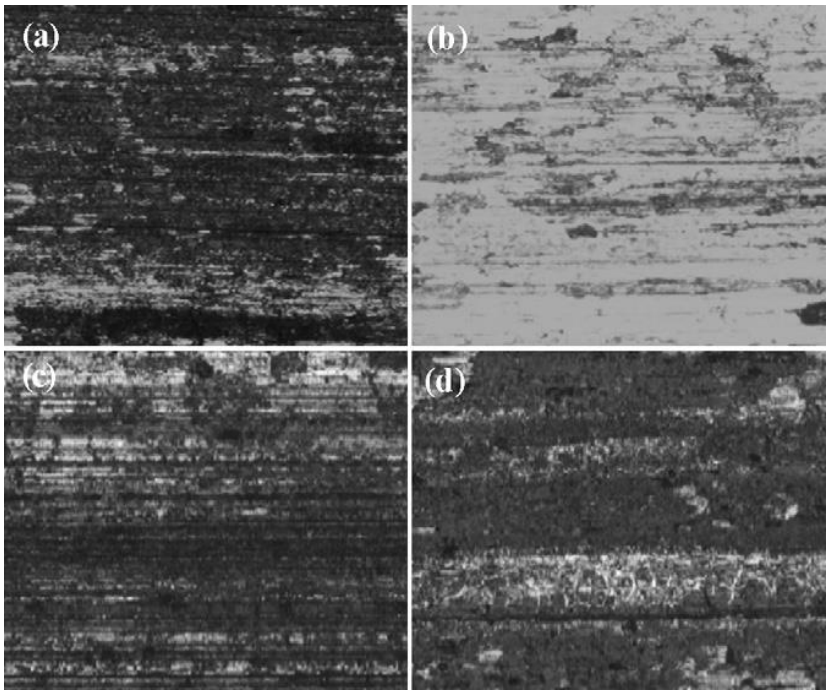
meg. A tanulmányok által leggyakrabban használt, súrlódást összehasonlító mérőszám a súrlódási együttható (COF), amely a 3.1.1. fejezetben, a (3.1.) egyenlet által ismertetett folyamat mentén számítható.

3.3.3. Kenőolaj minták okozta kopásvizsgálati lehetőségek összehasonlítása

A tribológiai vizsgálatok másik fontos eredménye a vizsgálati próbatestek felületén keletkező kopás mértéke. A kopás mértéke és annak fajtája fontos információval szolgál a relatív elmozdulás során létrejövő folyamatokról és mechanizmusokról. A tudományos irodalomban a kutatók különböző berendezéseket és mérési módszereket alkalmaznak a kopás számszerűsítésére.

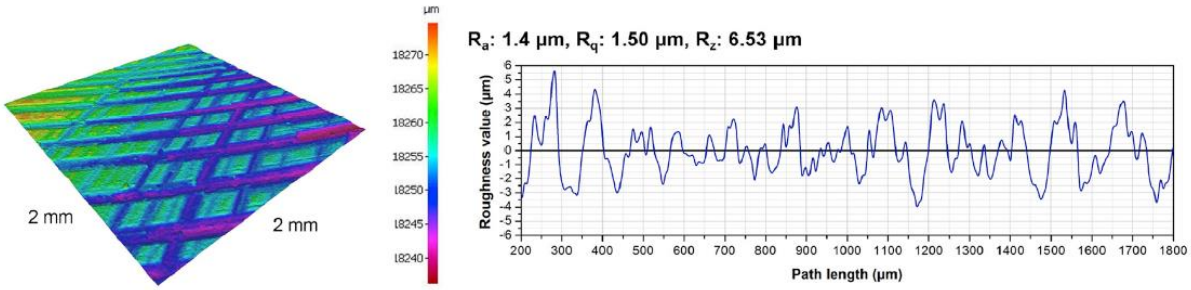
Az egyik legegyszerűbb és legköltséghatékonyabb kopásmeghatározásra alkalmas módszer a próbatestek tömeg alapján történő mérése [40]. Az elemzés során a vizsgálati próbatestek tömegét nagy pontossággal megmérjük a tribométeres vizsgálat előtt és után is, a két eredmény különbsége pedig a próbatest felületéről eltávozott anyag tömege. A tömegmérési eljárás hátrányaként megemlítendő, hogy a módszer nagyon érzékeny az alkatrészek tisztaságára, illetve az épületi rezgésekre, amelyek miatt a mérések sok esetben csak nagy szórásmezővel rendelkező eredményeket képes szolgáltatni. A tömegmérési eljárás korlátjai miatt a tömegmérést minden esetben ki kell egészíteni valamilyen mikroszkópos méréssel is. A tudományos tanulmányokban sok esetben nem is említik meg a tömegmérési eredményeket, vagy azért, mert nem végeztek ilyen vizsgálatokat, vagy azért, mert nem megfelelően pontos az eredmény.

Kedvelt és rendszeresen alkalmazott mikroszkópos eljárás az optikai vagy digitális mikroszkópia [64]. A mikroszkóp segítségével nagyított felvételeket lehet készíteni és az elkészült képeken meg lehet mérni a keletkezett kopásképe befoglaló méreteit (pl: golyó próbatesteken keletkező kopás átmérője). Nagyobb kopásmélységek esetén a kopásmélység is meghatározható. A tanulmányokban gyakrabban előfordulnak digitális mikroszkóppal végzett kopás-kiértékelések, elsősorban olyan próbatestek esetén, amelyeknél a mérés releváns információt hordoz magában, mint a golyó-tárcsa, vagy 4-golyós vizsgálatok esetén. Optikai mikroszkóppal különböző nanoadalékok okozta kopásképekről készült felvételekre mutat példát a 24. ábra.



24. ábra: Különböző nanoadalékok okozta kopásképekről optikai mikroszkóppal készült felvételek [66]

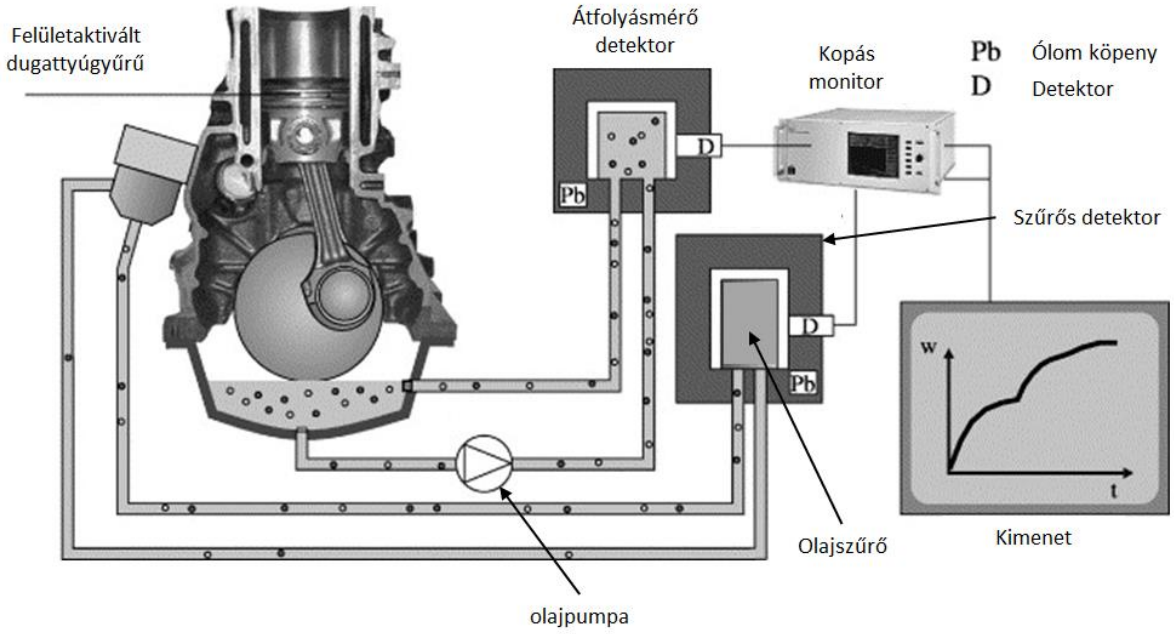
További kedvelt topográfia-vizsgálati eljárás a konfokális mikroszkóppal történő felületszkennelés [66]. Az eljárás lényege, hogy a mérendő felületet fénynyalábokkal bombázzák és a visszaverődő fénynyalábokat mérjük [68]. A mikroszkópban található tükrök segítségével a nem fókuszpontból érkező fénynyalábok kiszűrhetők. Az eredmények alapján minden mérési pont mikrométeres pontossággal meghatározható. Az elkészült felvételen különböző kiértékelések végezhetők, amelyek alkalmasak lehetnek kopás paraméterek meghatározására (pl: érdességi paraméterben bekövetkező változás, kopástérfogat-meghatározás a nem várt felülethez képest, kopási mélység meghatározás). Konfokális mikroszkópos felületszkennelésre és abból elkészíthető felületi érdesség vizsgálatra mutat példát a 25. ábra.



25. ábra: Konfokális mikroszkóppal készült felvétel és az abból nyerhető felületi érdességi profil [40]

Az egyik lehetséges megoldás kopás meghatározására az, hogy a vizsgálandó fém felületén a nem funkcionális felületre egy egyedi jelzést helyezünk el. Konfokális mikroszkóp segítségével a várható kopásnyom helye az egyedi jelzéssel együtt felvételre kerül, súrlódásos vizsgálat előtt és után is. A felvételek után a konfokális mikroszkóp kiértékelő szoftverében, az egyedi jelzés alapján a két mérés egymásra illeszthető, és a két mérés különbsége a kopott térfogat mennyisége [69].

További kopásmérési lehetőség az úgynevezett radionuklid technikás (radionuclide technology – RNT) online kopásmérési eljárás [70]. Ezen eljárás segítségével a radioaktívan megjelölt alkatrész felületén jelentkező kopás nagy pontossággal meghatározható. Az eljárás menetének sematikus ábrázolását a 26. ábra ismerteti. A radionuklid technikás kopásmérés során az előre elkészített, radioaktívan felületaktivált próbatesteket kell súrlódásos vizsgálatnak alávetni, amely vizsgálat során az érintkező felületekről olyan kopásszemcsék válnak le, amelyek radioaktív izotópokat tartalmaznak. Ezen kopásszemcsék bekerülnek a tribológiai vizsgálat során használt kenőolajba és velük együtt keringenek a rendszerben. Két detektor segítségével (egy átfolyásos detektor és egy szűrőt tartalmazó detektor) a kenőolajban található radioaktív izotópok időegység alatt létrejövő bomlása meghatározható, amely egyenes arányosságban áll a kopás mennyiségével. A mérőberendezés megfelelő kalibrálásával a mért izotóp koncentráció visszavezethető kopástömegre vagy kopásmélységre. A radioaktív izotópok bomlásának statisztikai mivolta, illetve a rendszer tehetetlensége miatt munkapontonként legalább másfél-két óra futtatandó a megfelelően pontos kiértékelés érdekében. Az eljárás legnagyobb előnye a pontosság mellett az, hogy egy bonyolultabb, több munkapontban üzemelő rendszer esetén nem szükséges munkapontváltások esetén szét- és újra összeszerelni a vizsgálandó rendszert a kopott felületek kiértékelése érdekében, sok holtidőt megtakarítva. Korlátként említendő a magas előkészületi költségek, illetve a speciális izotóplabor-engedélyek, az érintkező munkatársak sugárvédelmének biztosítása érdekében.



26. ábra: A radioniklud technikás online kopásmérési eljárás sematikus ábrázolása ([70], szerzői módosítással)

3.3.4. Kenőolaj minták kopásra gyakorolt hatásainak vizsgálati lehetőségei

A tribológiai vizsgálatok során nem csupán a keletkező kopás mennyisége, hanem annak típusa és kialakulási módja is kulcsfontosságú. A különböző kopási mechanizmusok csökkentése érdekében különböző intézkedések szükségesek. Az egyes kopási mechanizmusok a legtöbb esetben megkülönböztethetők egymástól a mikroszkópikus felvételeikről, illetve az érintkező felületeken hagyott kopásnyomaikból. Különböző eljárások léteznek, amelyekkel a keletkezett kopásnyomok, vagy kopásszemcsék megvizsgálhatók, keresve a jellemző jeleket a felületen és a szemcséken.

Az egyik leggyakrabban használt eljárás a kopott felületek nagy nagyítású elemzésére az úgynevezett pásztázó elektronmikroszkópia (scanning electron microscopy – SEM) [71]. További fontos információval szolgáltathat az úgynevezett energia-diszperzív röntgen spektroszkópia (energy dispersive X-ray spectroscopy – EDX) [66]. Egyes elektronmikroszkópok egyéb speciális lehetőségekkel vannak kiegészítve, mint például a FIB-metszet készítési lehetőség. A fókuszált ion sugaras megmunkálás (focused ion beam – FIB) [72] lényege, hogy egy alacsony áramerősségű ionsugárral egy precízen elkészített lépcsőzetes metszet készíthető a vizsgálandó próbatestből, amely lehetővé teszi a próbatest felületközeli 5 μm vastag rétegének metszeti vizsgálatát.

Az egymással érintkező felületeken található anyagok pontosabb, molekulaszintű vizsgálatához röntgen-fotoelektron spektroszkópia (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) alkalmazható [73]. Ez a technika a felületek, vagy vékonyrétegek anyagáról kémiai információt nyújt (5-10 nm az a rétegmélység, amiből információ nyerhető), mivel a vizsgált anyag elektronjainak kötési energiáját méri, ami az adott elem adott kémiai állapotára jellemző mennyiség.

4. Nanoméretű kerámiaszemcsék kenőolaj adalékként való alkalmazhatóságának szakirodalmi áttekintése

A nanoméretű kerámiaszemcsék kenőolaj adalékként való alkalmazhatósági vizsgálatai az elmúlt 20-30 évben jelentős fejlődésen mentek keresztül. A világ kutatói különböző szempontok szerint vizsgálták meg ezeket a szemcséket annak érdekében, hogy megállapítsák, lehetséges-e az ilyen szemcsék alkalmazásával a mechanikai rendszerek tribológiai veszteségeinek csökkentése, esetleg lecserélhető-e néhány adalék típus ezekre a szemcsékre.

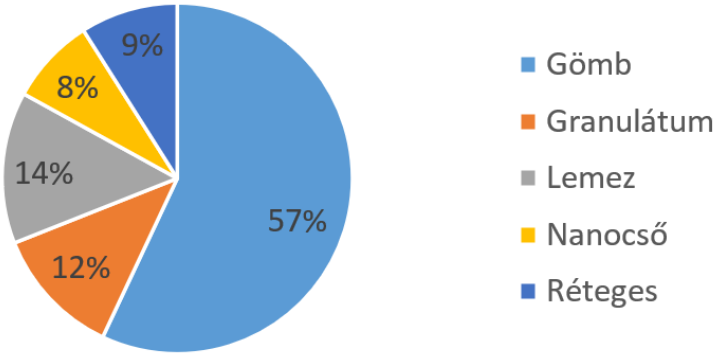
A nanoméretű kerámiaszemcsék vizsgálata széleskörű folyamat, amelynek legvégén a velük elkészített olajminták teljesen valósághű vizsgálatai állnak. Szükséges megállapítani a szemcsék reológiai tulajdonságait, lehetséges működési mechanizmusait és tribológiai hatásait. Annak érdekében, hogy ezeket a szemcséket egy olyan komplex rendszerben, mint egy belsőégésű motor is lehessen alkalmazni, szükséges megvizsgálni a szemcsék hatását a motor egyéb rendszereire is (például olajszűrő eltömődés vagy kipufogógáz utókezelő rendszerek).

4.1. Nanoméretű kerámia kenőolaj adalékok

A nanoméretű kerámia anyagminőségű szemcsék kenőolaj adalékként való alkalmazásának kutatása már több, mint 20 éve foglalkoztatja a kutatással és fejlesztéssel foglalkozó tudósokat, azonban a 2000-es évek közepe óta jelentősen megnőtt az érdeklődés irányukba. A különböző, egyre szigorodó emissziós előírások teljesítése érdekében ezen terület is felerősödött, mint egy lehetséges fejlesztési irányzat a személygépjárművek üzemanyag fogyasztásának csökkentésére.

A nanoméretű részecskéket az ISO/TS 80004-es számú nemzetközi szabvány definiálja olyan anyagként, amely képes különálló egységként viselkedni mindhárom definiált dimenzióban és a leghosszabb és a legrövidebb mérete 3 nagyságrenden belül található [74]. A nanoméretű szemcsék átlagos részecskemérete 1–100 nm-es tartományban mozog [50]. A részecskék körül egy körülvevő vékony réteg található, amely alapvetően befolyásolja a részecskék fizikai és kémiai tulajdonságait. Ezen körülvevő réteg általában különböző molekulák ionos csoportjait tartalmazza. Ezen vékony réteg miatt a nanorészecskék méretfüggő tulajdonságai szignifikánsan eltérőek a finom szemcséktől, vagy nagyobb anyagokétól [74].

Különböző anyagösszetételű nanokerámia szemcsék léteznek, amelyek alkalmasak lehetnek kenőolaj adalékként való alkalmazásra: fém-oxidok (pl: TiO_2, CuO, Fe_3O_4, ZnO, Co_3O_4, Al_2O_3, stb.), fém-szulfidok (pl: MoS_2, WS_2, FeS, stb.), nanokompozitok (Cu/CeO_2, Al_2O_3/SiO_2, ZrO_2/SiO_2, stb.), illetve ritkaföldfém vegyületek (pl: $CeVO_4$, Y_2O_3, $La(OH)_3$, LaF_3, stb.) [39]. A nanoméretű szemcsék iránti kíváncsiság azért is ilyen jelentős, mivel a lehetséges anyagösszetételi variációk száma jelentős: amellett, hogy az anyagkombinációk száma magas, különböző arányban összekeverve kompozitként is vizsgálhatók és elemezhetők. A részecskék formáját tekintve is különbözők lehetnek: gömb, granulátum, lemez, nanocső illetve réteges szerkezet [39]. Az irodalmi források alapján a nanorészecskék morfológiai eloszlását a 27. ábra szemlélteti. A réteges, héjas, illetve a gömb formájú részecskékről általánosságban elmondható, hogy kiváló tribológiai jellemzőkkel rendelkeznek. A gömbformájú szemcsék a formájukból adódóan magas terheléseket is képesek elviselni, mivel képesek apró golyóscsapágyakként viselkedni a két súrlódó felület között és a csúszási súrlódást gördülési súrlódó mozgássá átalakítani.



27. ábra: Nanoméretű részecskék morfológiai eloszlása, ([75], szerzői kiegészítéssel)

Dubey és társai [45] összefoglalták az irodalomban fellelhető információkat számos nanoméretű részecskéről, amelyeket különböző kutatók tribológiailag vizsgáltak. Az összefoglalás eredményét a 2. táblázat ismertet.

2. táblázat: Nanorészecskékkel adalékolt olajminták teljesítményre vonatkozó optimális koncentrációja ([45], szerzői módosítással)

Nanorészecske	Méret [nm]	Tömeg%	Optimum konc. [tömeg%]	Forrás
WS_2	10 - 15	0-2	2	[76]
IF-WS_2	-	1, 5 és 10	10	[77]
ZnS-DDP bevonattal	4	0,05 - 0,4	0,1	[78]
LaF_3-DDP bevonattal	6	0,05 - 1,5	1	[79]
PbS – olajsav	8	0,05 - 0,4	0,2	[80]
Cu	2	0 - 1	1	[81]
Ni	20	0,5, 1 és 2	0,5	[82]
CuO	30 - 50	0,5, 1 és 2	1	[51]
ZnO	20	0,5, 1 és 2	0,5	
ZrO_2	20 - 30	0,5, 1 és 2	0,5	
Nano-gyémánt	20	0,05, 0,1 és 0,15 g/l	0,05 g/l	[83]
Cink-borát	20 - 50	0,5 - 2	1,5	[84]
TiO_2	40	0,01 - 1,4	0,25	[85]
Cu	25	0,5 és 2	0,5	[86]
Ni	10	0,25 - 3	0,25	[87]

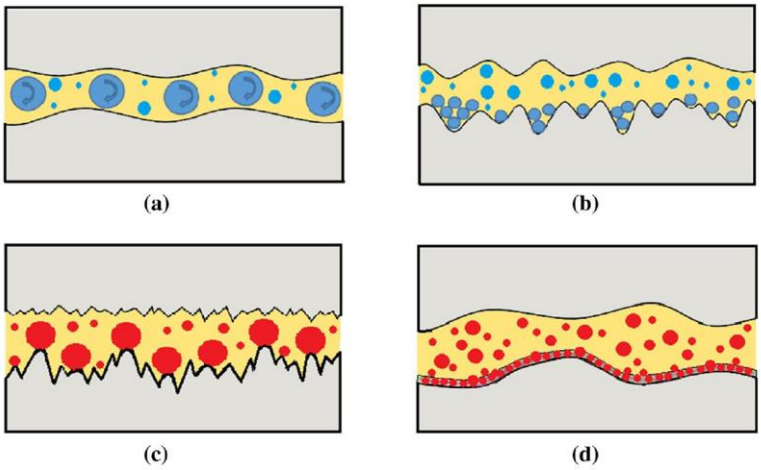
A nanorészecskék átlagos szemcseméret és az érintkező felületek között egyértelmű korreláció figyelhető meg, amelyet Peña-Parás és társai [40] bizonyítottak TiO_2 nanorészecskék jelenléte mellett. Csak olyan méretű nanoszemcsék képesek pozitív tribológiai hatásokat kifejteni, amelyek átlagos szemcseméret kisebb, mint az érintkező felületek átlagos felületi érdessége (R_a). Amennyiben az átlagos szemcseméret nagyon alacsony, a másodlagos Van der Waals-erők által kialakított kötések könnyebben össze tudják tartani a szemcséket, ezáltal nagyobb agglomerációkat létrehoza. A túl nagy szemcseméret pedig nem képes megfelelően feltölteni az érdességi árkokat, tehát erősíti a súrlódó felületeken kialakuló 3-test abráziós kopás jelenségét. Ezek alapján minden egyes tribológiai rendszer esetén egyértelműen megállapítható egy optimális szemcseméret.

Minden egyes nanoméretű kenőolaj adalék esetén kiemelt fontossággal bír a bekeverési koncentráció [88]. Nagy általánosságban elmondható, hogy a nanorészecskékkel adalékolt kenőolaj hatékonyan képes csökkenteni a súrlódási és kopási veszteségeket, akár 1 tömegszázalék alatti [89], akár 2 tömegszázalék feletti [90] koncentrációban is, amely alapján kijelenthető, hogy ezen nanorészecskéknek nehezen állapítható meg az optimális

koncentrációja. Azonban megjegyzendő, hogy egy olyan optimum koncentráció megállapítható, ahol a mérhető súrlódási együttható (COF) a legalacsonyabb. Az ilyesfajta optimális koncentráció erősen függ a vizsgálati rendszertől, mivel a kenőolaj összetételét minden esetben a működési állapotokhoz kell igazítani [91]. Összességében megállapítható, hogy a nanorészecskék képesek csökkenteni a tényleges kontaktfelület nagyságát, ezáltal csökkenteni a súrlódási veszteségeket határréteg súrlódási és kenési állapotban. A részecskék a működésük során elválasztják egymástól az érintkező felületeket, amely egyértelműen javítja a rendszer tribológiai tulajdonságait.

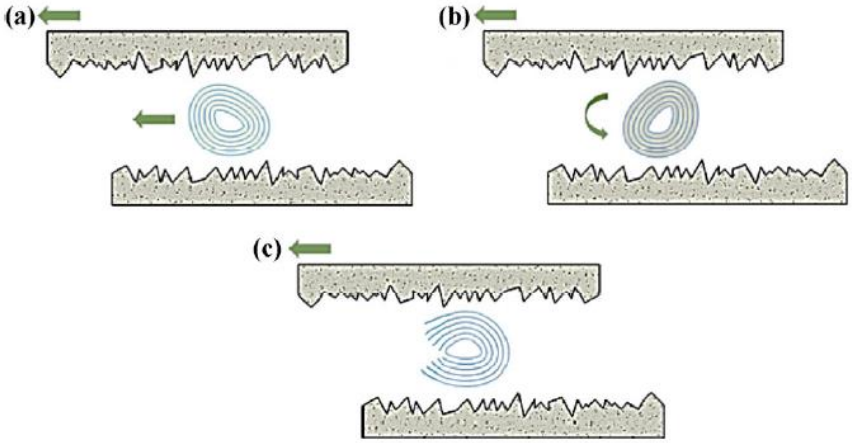
Különböző működési mechanizmusok jelentek meg a tudományos irodalmakban, amelyek alapján megmagyarázhatók a kísérleti eredmények. Zhang és társai [92] összefoglalva ismertették ezeket a lehetséges működési mechanizmusokat, amelyeket a 28. ábra grafikusan is szemléltet:

a) **Gördülő, vagy golyóscsapágy mechanizmus:** a nanorészecskék nanoméretű golyóscsapágyakként viselkednek az érintkező felületek között és ezáltal képesek a fémes felületek között fellépő csúszó súrlódást gördülő súrlódássá alakítani, csökkentve ezáltal a súrlódási veszteségeket és a keletkező kopás mennyiségét.
b) **Feltöltő mechanizmus:** a nanorészecskék képesek feltölteni a felületen található érdességi vagy kopási árkokat, kisimítva az érintkező felületet és ezáltal növelve a teherhordó felület arányát. A feltöltő mechanizmus csak abban az esetben képes működni, ha – a Peña-Parás és társai [40] által ismertetett módon – az átlagos szemcseméret kisebb, mint a felület átlagos érdessége. Amennyiben a felületen található árkok már feltöltődtek nanorészecskével, további csekély mennyiségű nanorészecske jelenléte esetén a golyóscsapágy mechanizmus is kialakulhat.
c) **Polírozó mechanizmus:** egyes adalékok képesek a tribológiai rendszer bejáratási fázisában (felületek összekopása) felgyorsítani a felületek összekopását, bejáratódását, ezáltal is javítva az érintkező felületek százalékos arányát.
d) **Védőréteg képző mechanizmus:** a kenőolajban található nanorészecskék képesek másodlagos kötésekkel hozzátapadni, hozzáhegedni a fémes felületekhez, és ott egy olyan tribológiai védőréteget képezni, amely meggátolja a fémes érintkezést. Ezen védőréteg jelenléte esetén a fémes felületek mindig csak a védőrétegen keresztül érintkeznek egymással, így csökkentve a súrlódást és a kopást. A védőréteg képző mechanizmus nem csupán az érintkező felületek védelmét biztosítja, hanem a felületi repedések keletkezését, illetve továbbterjedését is képes gátolni [93].



28. ábra: Nanoméretű kenőolaj adalék részecskék lehetséges működési mechanizmusai, a) gördülő mechanizmus, b) feltöltési mechanizmus, c) polírozó mechanizmus, d) védőréteg képző mechanizmus [94]

Egyes források megemlítik a többrétegű fullerén típusú (inorganic fullerene – IF) nanorészecskék súrlódási mechanizmusát is, úgymint csúszás, gördülés, lehámlás ([75], [95]. A többrétegű fullerén típusú nanorészecskék súrlódási mechanizmusait a 29. ábra grafikusan is szemlélteti. A csúszás esetén a nanorészecske egyszerűen egy elválasztó elemként működik a két érintkező felület között, míg gördülés esetén a két felület között gördül, amely mechanizmus fennállásához elengedhetetlen a nanorészecske gömb formájú kialakítása. A lehámlás esetén a mozgás hatására a többrétegű nanorészecskék felületéről fokozatosan válnak le a külső rétegek és ezek átkerülnek az érintkező felületek érdességi árkaiba. Az így kialakult új felületnek sokkal nagyobb a teherhordó képessége, könnyebb az oldalirányú elmozdulás az érintkező síkokon.

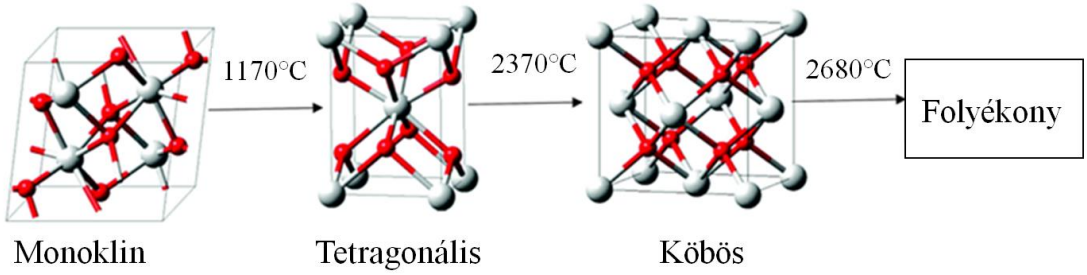


29. ábra: A többrétegű fullerén-típusú nanorészecskék három fő súrlódási mechanizmusa: a) csúszás, b) gördülés, c) lehámlás [75]

A szakirodalomban fellelhető információk alapján megállapítható, hogy a nanoméretű kerámia szemcsék kenőolaj adalékként való alkalmazhatósága ígéretes terület, azonban még további kutatási munkák elvégzése szükséges annak érdekében, hogy a jövőben személygépjárművekben is tömeggyártásban használható motorolajat lehessen készíteni ezek felhasználásával. Azonban az egyértelműen megállapítható, hogy a lehetséges anyagösszetétel variációk száma közel végtelen, így az összes kombináció megvizsgálására jelen disszertáció időbeli és terjedelmi korlátai miatt nincs lehetőség. A továbbiakban három nanokerámia szemcse kerül részletesebb ismertetésre, mivel kutatásaim során is elsősorban ezekkel az adalékokkal foglalkozom.

4.1.1. Cirkónium(IV)-oxid kerámia

A cirkónium(IV)-oxid anyag (ZrO_2, másnéven cirkónia) egy fehér színű, kristályos oxid kerámia. A cirkónium(IV)-oxidot cirkónium tartalmú vegyületekből és ércekből állítják elő, úgynevezett kalcinálás (magas hőmérsékletre való hevítés oxigén-tartalmú közegben) folyamat felhasználásával. A cirkónia elsősorban a baddeleyit nevezetű ásványban fordul elő. Általában monoklin kristályos szerkezetű, azonban a struktúrája különböző hőmérsékleten eltérő. Három különböző fázisa ismert légköri nyomáson: monoklin kristályos szerkezet 1170°C alatt, tetragonális szerkezetű 1170°C és 2370°C között, míg köbös szerkezetű 2370°C felett. A hőmérséklet növelésével a kristályszerkezeti struktúra szimmetrikussága növekszik [96]. A különböző cirkónium(IV)-oxid kristályszerkezeteket a 30. ábra szemlélteti.



30. ábra: A cirkónium(IV)-oxid hőmérséklet hatására történő fázisátalakulásai, légköri nyomáson ([96], szerzői módosítással)

A cirkónia magas kémiai ellenálló képességgel rendelkezik erős savakkal szemben is. Továbbá a korrózióálló képessége is kiváló, hiszen ellentétben más műszaki kerámiákkal, a cirkónia nem morzsolódik korrózió hatására. Összehasonlítva más, sűrűn használt kerámiákkal, a cirkónia szobahőmérsékleten kitűnő fizikai teherbírással és mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik. A cirkónium(IV)-oxid sűrűsége 5,68 és 6,08 kg/dm^3 közötti

tartományon belül mozog, amely a kerámia kristályszerkezetétől függ. Mechanikai tulajdonságait tekintve magas keménységgel rendelkezik (~1200 HV), nyírószilárdsága 900-1200 MPa értékek között mozog, míg nyomószilárdsága 2000 MPa. Más fémekkel összehasonlítva alacsonyabb kifáradási ellenállás (7-10 MPa/m^2), és hasonló Young-modulus (~210 GPa) figyelhető meg, a hőtágulási tényezője pedig $11 \cdot 10^{-6}$ $^1/_K$ [96]. Ezen kiváló tulajdonságok miatt, a cirkónium(IV)-oxid az egyike azon mérnöki kerámia anyagoknak, amelyeket a legtöbbet vizsgálják és elemzik a kutatók.

A cirkónium(IV)-oxidot a mai mérnöki tudomány széleskörben alkalmazza, amelyre egy jó példa a kerámia-kések, amelyek egyre inkább elterjednek a háztartásokban. Járműipari vonatkozásban a cirkónium(IV)-oxid anyagot vizsgálják alacsony siklási tulajdonságú és jó kopásállóságú bevonatanyagként is [97], [98]. A cirkónium(IV)-oxidot sokszor valamilyen más anyaggal - például ittria (Y_2O_3 [99-100]) - keverve használják, így maximalizálva az anyag kínálta lehetőségeket.

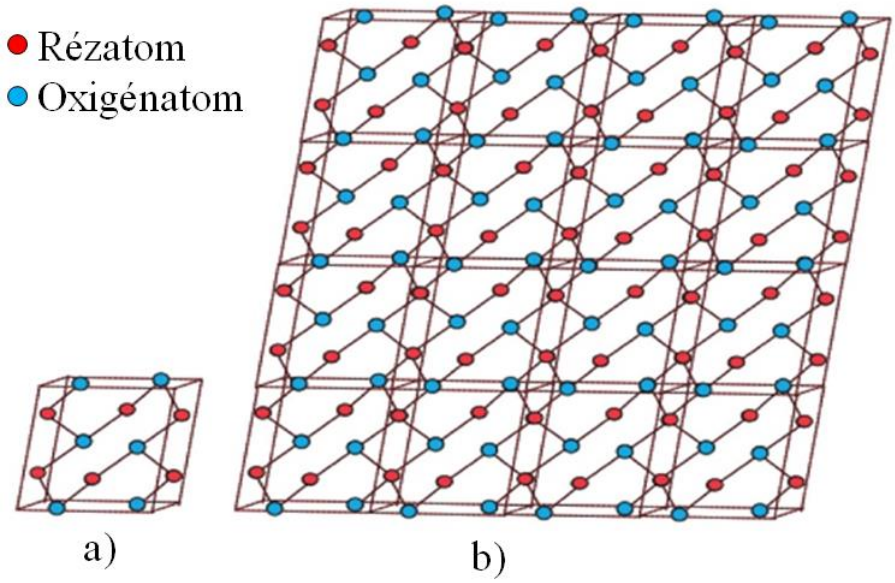
A cirkónia kerámiát nanoadalékként is kutatják, elsősorban a termofizikai karakterisztikája, illetve kedvező reológiai tulajdonságai miatt. Tribológiai szempontból a vizsgálatok elsődleges fókuszpontja a nanorészecskékkel adalékolt kenőolaj súrlódási veszteségeinek csökkentése és a mozgás során keletkező kopás mértékének minimalizálása. Különböző tanulmányok jelentek meg az elmúlt években a cirkónium(IV)-oxid nanorészecskék súrlódás-csökkentő hatásairól, 5 és 28% közötti csökkentésről számoltak be [101]. További súrlódáscsökkenés is biztosítható (27-45%-os csökkentés), amennyiben az egyes cirkónium(IV)-oxid szemcsék felület-aktiválási folyamaton esnek át a vizsgálatok előtt [102]. A cirkónium-kompozit nanorészecskék esetén szintén pozitív tribológiai hatásokról jelentek meg tanulmányok, amelyek 16%-os súrlódás csökkenésről számoltak be [103]. A publikációban Kerkwijk és társai [104] a cirkónia nanorészecskék önkenő mechanizmusát tárták fel különböző oxid-kerámiák jelenléte mellett, amelynek eredményeként a száraz súrlódási tartományban mért súrlódási együttható szignifikánsan csökkenthető. A vizsgált adalék-kompozit variációk közül a ZrO_2/CuO párosítás okozta a legnagyobb arányú súrlódáscsökkenést, a mért érték 40%-kal csökkent. Néhány tanulmány olyan cirkónium(IV)-oxid nanorészecskékkel foglalkozik, amelyek átlagos szemcsemérete 20-30 nm és 15 tömegszázalékban alumínium-oxiddal (Al_2O_3) bevonatolt. A bevonatokkal mikrotribológiai vizsgálatokat végeztek el nagyon alacsony terhelési szinteken (0,03-0,1 N), és az eredmények 20-63%-os súrlódáscsökkenést mutattak, a referenciaként használt nanorészecskékhez (Al_2O_3/Al_2O_3) képest [105].

A cirkónia adalék kopásra gyakorolt hatása is sok tanulmányban vizsgált. A tanulmányokban ismertetett eredmények bizonytalanok, hiszen 37%-os kopáscsökkenést és 66%-os kopásnövekedést is publikáltak különböző folyóiratcikkekben [101-102]. Multialkilált ciklopentán anyagok képesek erősíteni a cirkónium(IV)-oxid nanorészecskék tribológiai hatásait. Egy kemény kerámia tribofilm védőréteg keletkezik az érintkező felületeken, megvédve őket a végzetes kopástól és károsodástól, illetve képes a tribológiai behatások mértékét csillapítani [63]. Cirkónia-adalékolt kenőolaj minta alacsonyabb kopás sebesség értékeket mutatott amellett, hogy használatával növelni lehetett a maximális kontakt nyomás értékét. A cirkónium(IV)-oxid kenőolaj adalék magasabb nyomás értékeket (400 MPa felett) és magasabb hőmérsékleti értékeket (500-800°C) is képes elviselni [106-107]. A stabilizált cirkónia nanorészecskék az extrém magas hőmérsékletnek is képesek ellenállni (800°C) [108]. A kopás sebességének csökkentése szempontjából az egyik legfontosabb paraméter a nanorészecskéket tartalmazó kenőfilm kialakulása és annak hatékony eloszlása [99]. Li és társai [103] megállapították, hogy a kemény cirkónia szemcsék a korábban ismertetett gördülő mechanizmus alapján működnek. Rani [109] standardizált 4-golyós tribológiai vizsgálatokat végzett el és a keletkező nanorészecskéket tartalmazó tribológiai határfilmet vizsgálta pásztázó elektronmikroszkóppal (scanning electron microscope – SEM) és energia-diszperzív röntgen-spektroszkópiával (energy-dispersive X-ray spectroscopy – EDX). A vizsgálatok során az optimális koncentráció 0,7 tömegszázalékra adódott a vizsgált nanoméretű cirkónia szemcsék felhasználásával, azonban a kopáscsökkentő tulajdonságai már nem voltak annyira meggyőzőek.

A nanoméretű cirkónium(IV)-oxid kenőolaj-adalékként történő vizsgálata egy olyan terület, amely folyamatosan fejlődik és kutatása kecsegtető. Pozitív súrlódás- és kopáscsökkentési eredményekről számol be a szakirodalom. A fellelhető információk alapján a cirkónium(IV)-oxid nanoadalék elsődleges működési mechanizmusa a nano-csapágygolyók által biztosított gördülő mechanizmus. A cirkónia kerámiát sok esetben más anyaggal (pl: Y_2O_3) stabilizálják azért, hogy a magas hőmérsékleten történő repedéskeletkezést és repedésterjedést megakadályozzák.

4.1.2. Réz(II)-oxid kerámia

A réz(II)-oxid (CuO, angolul cupric oxide) egy fekete színű, szilárd halmazállapotú kristályos átmenetifém oxid. Ezen szervetlen vegyület egyike a réz ismert stabil oxidjainak, a másik vegyület pedig a réz(I)-oxid (Cu_2O, angolul cuprous oxide). A réz-oxid egy természetben is előforduló ásványként, tenorit néven is ismert anyag. A réz bányászata során nyerhető anyag, illetve az előjele több másfajta réztartalmú ércnek és kémiai vegyületnek. A réz(II)-oxidot nagy mennyiségben pirometallurgiai módszerrel állítják elő, amely az egyik állomása a különböző ércekből való réz kinyerésnek. A réz(II)-oxid a monoklin kristályrácsú anyagok csoportjába tartozik. A réz atom négy oxigén atommal van közvetlen kapcsolatban egy térhálós konfigurációban [110].



31. ábra: A réz(II)-oxid, CuO: a) egységcella, b) CuO rácsszerkezet ([110], szerzői módosítással)

A nanoméretű réz(II)-oxid, összehasonlítva a makroszkopikus méretű réz-oxiddal, kitűnő katalitikus aktivitással és szelektivitással rendelkezik. Amennyiben a részecskének legalább az egyik dimenziója kisebb, mint 100 nm, a részecskék tulajdonságai drasztikusan megváltoznak. Összehasonlítva a normál makroszkópikus méretű réz(II)-oxiddal, a nano CuO sajátos fizikai és kémiai tulajdonságokkal rendelkezik, úgy, mint: felületi jelenségek felerősödnek, megjelenik a méretből adódó kvantumbezárás jelensége, megfigyelhető a parciális térfogathatás és a mágneses alagúthatás, megváltozott optikai fényelnyelés, kémiai aktivitás és hőmérsékletnek való ellenállás, illetve az olvadáspont eltolódása.

A réz(II)-oxid egy oxidációs folyamat végterméke, ezáltal nem képes további oxidációra, ellentétben az elemi rézzel, vagy a réz(I)-oxid vegyülettel. Normál körülmények között a CuO stabil vegyület, azonban magasabb hőmérsékleten könnyen redukálható különböző redukáló anyagok (pl. C, CO, H_2) jelenlétében. Ezen oxid 1326°C-on olvad, sűrűsége 6,315 kg/dm^3 közelében van [111]. A hajlító szilárdságát és a Young-modulusát nanovezeték formában Polyakov és társai [111] tesztelték, és megállapították, hogy a réz(II)-oxid hajlító szilárdsága 8,2 ± 2,7 GPa, míg Young-modulusa 204 ± 116 GPa nagyságú.

Annak ellenére, hogy a réz(II)-oxid szigorúan nézve nem tartozik a kerámiák közé, gyakran alkalmazzák adalékként, hiszen mechanikai tulajdonságai hasonlóak a kerámiákéhoz. Adalékként alkalmazva a nanoméretű réz(II)-oxid növelheti a kerámiák szívósságát [112], azonban azok keménységét kismértékben csökkenti [113]. Továbbá nanoméretű CuO részecskéket alkalmaznak beton felépítményekben is annak érdekében, hogy növeljék a nyomószilárdságot [114]. Liu és társai [115] számítások útján megállapították a réz(II)-oxid hőtágulási együtthatóját, 296 K hőmérsékleten ~$12 \cdot 10^{-6}$ $^1/_K$ értékre adódott.

A kerámiaszerű fizikai és mechanikai tulajdonságai miatt a CuO anyagot széleskörben alkalmazzák a kerámia iparban. A réz(II)-oxidot színanyagként is alkalmazzák különböző kerámiákban annak érdekében, hogy fekete és zöld glazúr bevonatokat hozzanak létre. A CuO fontos anyag a cellulóz iparban a Schweizer reagens alapanyagaként, amely a műselyemgyártáshoz használatos. A réz(II)-oxidot a vegyipar használja a réz alapú sók illetve fa tartósítószerek fő nyersanyagaként. A CuO anyagot továbbá használják a réz alapú ötvözetek hegesztéséhez is, illetve néhány lítium-alapú akkumulátor katódjának alapanyagaként is. A réz(II)-oxidot tévesen alkalmazzák az emberi és az állati étrendkiegészítőkben is. Az alacsony biológiai aktivitása miatt csupán elhanyagolható mennyiségű réz képes felszívódni a szervezetben, így könnyen felhalmozódik. Az emberi testben való felhalmozódása toxikus hatásokat okozhat (nem csak emberekben, hanem állatokban, vizekben és nedves természetes környezeti kultúrákban is). A réz(II)-oxid kitűnő anyag arra a célra, hogy veszélyes anyagokat oxidáljon és semlegesítsen: cianidokat, szénhidrogéneket, halogénezett szénhidrogéneket és dioxin csoportokat.

A réz(II)-oxid nanokerámiát (CuO) szintén sok kutatásban vizsgálták már. Kato és társai [116] a keletkező tribológiai védőréteg megerősödését tapasztalták ilyen nanokerámia jelenléte mellett. Wu és társai [66] kutatásokat végeztek a réz-oxid nanokerámia működési mechanizmusának megértése érdekében és megállapították, hogy a részecskék gördülő köztes elemként viselkedtek a kontakt felületek között. Manu és társai [117] 0,34 tömegszázalékos optimális koncentrációt állapítottak meg kókuszolajba kevert réz-oxid esetén, így elérve a

részecskék legjobb tribológiai tulajdonságait gördülő mechanizmus jelenléte mellett. Alves és társai [118] a nanorészecskék kopásgátló tulajdonságait tanulmányozták különböző bázisolaj típusok vizsgálata során, és ismertették, hogy a nanorészecskék lerakódnak a súrlódó felületekre, ott elősegítik a tribológiai védőréteg képződését és ellenálló képességét, amely képes csökkenteni a rendszer által okozott súrlódási együtthatót. Battez és társai [73] a réz-oxid részecskék triboszintézisét és a nanorészecskék gördülő hatásait bizonyították NiCrBSi bevonatolt próbatestek jelenléte esetén. A röntgen-fotoelektron spektroszkópia (X-ray photoelectron spectroscopy – XPS) elemzés megállapította, hogy réz elem található a kopott felületeken, amely a réz-oxid és a Ni-tartalmú bevonat interakciójából képződött.

A réz(II)-oxid tribológiai tulajdonságai mellett sok kutató a CuO redukcióját is vizsgálta különböző peremfeltételek esetén [119]. Yuan és társai [120] ismertették, hogy a nanoméretű CuO már 150°C-os hőmérsékleten elkezd redukálódni alacsony környezeti nyomás jelenléte mellett. Goldstein és társai [121] megállapították, hogy a CuO képes már 473 K (200°C) hőmérsékleten elemi rézzé redukálódni, amennyiben a reakció szén-monoxid környezeti médiumban történik. A kísérleteket termokémiai számításokkal támasztották alá. Kim és társai [122] demonstrálták, hogy normál hidrogén-gáz adagolása esetén a CuO képes úgy fémes elemi rézzé alakulni, hogy nem képződik köztes vegyület. Wang és társai [123] a CuO-Cu redukció folyamatának komplex mechanizmusát és a keletkezendő szuboxidokat vizsgálták szén-monoxid gáz környezeti médium jelenléte mellett. A szuboxidok magas fokú rendszertelenségben helyezkedtek el, beágyazódva a rácsszerkezetbe. Okayama és társai [124] a CuO triboredukciós folyamatát ismertették hagyományos fékpofák felületein. A kísérleteket különböző hőmérsékleteken végezték el (40, 80, illetve 120°C). A kísérletek során megállapították, hogy felléptek olyan üzemállapotok, amikor a rendszerben a lokális hőmérséklet szignifikánsan magasabb volt, mint a névlegesen beállított hőmérsékleti érték. Ezen pontok esetén egyértelműen ki lehetett mutatni az elemi réz jelenlétét, amely arra enged következtetni, hogy a CuO-Cu redukció sokkal könnyebben és gyorsabban végbe megy magasabb hőmérsékleti értékek jelenléte mellett. A kutatásaikban azt a hipotézist állították fel, hogy a fenolos gyanta egyik összetevője elősegíti a redukciót.

Akl és társai [58] kihasználták a CuO nanorészecskék előnyeit annak érdekében, hogy javítsanak a tribológiai teljesítményen és a CuO nanorészecskék használatát erősen ajánlják olyan berendezésekben, ahol az alacsony kopás kulcsfontosságú.

Battez és társai [51] a réz(II)-oxid nanorészecskéket PAO6 (6 cSt kinematikai viszkozitású polialfaolefin bázisolaj) típusú bázisolajban vizsgálták és megállapították azt, hogy a CuO nanorészecskék csekély mértékben képesek csökkenteni a súrlódási veszteségeket, azonban kitűnő kopáscsökkentő tulajdonsággal rendelkeznek. A CuO nanorészecskék súrlódási veszteség és kopássebesség [125] csökkentő hatásait más tanulmányok is bizonyították, különböző ipari kenőolajok jelenléte mellett.

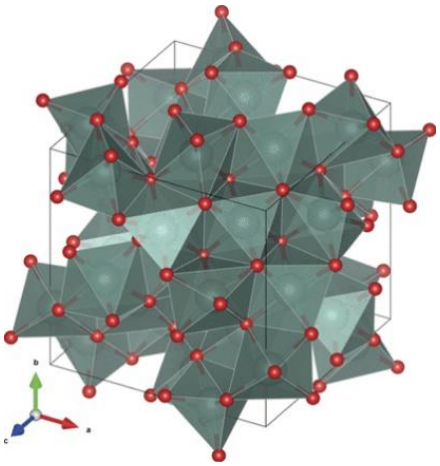
Annak érdekében, hogy a nanorészecskék a bennük rejlő potenciált maximálisan ki tudják fejteni, a homogén és stabil adalék-olaj elegy biztosítása kulcsfontosságú. Ettafaghi és társai [126] kifejlesztettek egy bekeverési folyamatot, amellyel a nanorészecskék tribológiailag fontos tulajdonságai biztosíthatók. A vizsgálataik során ASTM szabványok alapján vizsgálták az elkészült olajminták kinematikai viszkozitását, dermedéspontját és forráspontját. Annak érdekében, hogy az elkészült keverék stabilitása hosszabb ideig is biztosított legyen, a használt adalékok legkülső felületét gyakran különböző folyamatokkal aktiválják. Alves és társai [127] olajsavval módosították a CuO nanorészecskék külső felületét és ígéretes eredményeket tettek közzé, amelyekben alacsony bekeverési koncentráció esetén is lehetővé vált a súrlódás és a kopás csökkentése. Liu és társai [128] a CuO nanorészecskéket elemezték transzmissziós elektronmikroszkóp (Transmission Electron Microscopy – TEM), röntgendiffrakció (X-ray Diffraction – XRD) és Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia (Fourier-transform infrared spectroscopy – FTIR) segítségével, hogy bizonyítsák a felület-módosított külső réteg tényleges jelenlétét a részecskék felületén.

A nanoméretű réz(II)-oxid kerámia szemcsék tribológiai tulajdonságait már szériaérett motorolajban is vizsgálták, Ali és társai [59] 20W-40-es viszkozitási osztályú kenőolajat használtak fel a kutatásaik során. Akl és társai [129] valóságos belsőégésű motorban vizsgálták a CuO nanorészecskék hatásait, az alumínium, réz és króm tartalmú motoralkatrészek kopására fókuszálva és megállapították, hogy a CuO nanorészecskék az alumínium és króm tartalmú alkatrészeken megfigyelhető kopást 42-48%-kal képesek csökkenteni.

A nanoméretű réz(II)-oxid kerámiaszemcsék kenőolaj-adalékként számos tanulmányban jelentek meg, amelyek pozitív, ígéretes tribológiai eredményeket ismertettek. Továbbá számos kutatás foglalkozott a CuO-redukcióval, amely során a nanokerámia képes elemi rézzé redukálódni.

4.1.3. Ittrium(III)-oxid kerámia

Az ittrium-oxid (Y_2O_3, másnéven ittria) egy levegőn stabil, fehér színű, szilárd kristályszerkezetű oxid kerámia. Az ittria erősen hasonlít lantanoida oxidokra a legtöbb tulajdonságában. Az ittria kerámiát az ittriumot tartalmazó vegyületek és ércek égetésével készítik. További ipari gyártási lehetőségként megemlítendő az olyan vegyületből való kinyerés, amelyek nehezebb lantanoidákat is tartalmaznak. Az ittria természetben is előfordul a saját ásványában, amelyet yttriaite-(Y)-nak neveznek. A természetben az ittria térközepes köbös szerkezetben fordul elő, azonban a kristályszerkezete hőmérsékletfüggő: a térközepes köbös szerkezet képes átalakulni hexagonális kristályszerkezetté 2640 K hőmérséklet felett.



32. ábra: Az ittrium-oxid kerámia térközepes köbös kristályszerkezete [130]

Az ittria kerámiát elsősorban a magas hőstabilitásáról ismerik, amelynek köszönhetően extrém hőmérsékleteken működő rendszerekben való üzemelésre kiválóan alkalmas. A ritkasága miatt nagyon kevés esetben alkalmazzák önállóan, általában más anyagokkal kombinálva használják. Az ittria anyagot elsősorban a cirkónia kerámia magas hőmérsékleten való stabilizálására alkalmazzák, továbbá szinterezési segédanyagként a szilícium-nitridekhez és SiAlON kerámiákhoz, nikkel-ötvözetek megerősítéséhez, LED-komponensekhez, magas hőmérséklet-álló kerámiákhoz használják. Alkalmazzák ezen kívül szilárd-állapotú lézerek bázisanyagaként, magas hőmérsékleten üzemelő szupervezetők nyersanyagaként és mikrohullámú szűrőkben is [131].

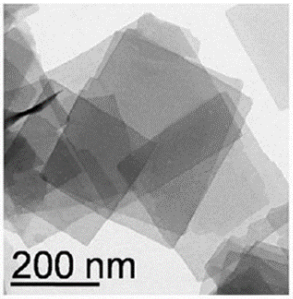
Az ittria a kerámiák általános jellemzőivel rendelkezik, beleértve a magas keménységet, magas mechanikai szilárdságot, magas hőstabilitást, kémiai és eróziónak való ellenállást, illetve az alacsony elektromos vezetőképességet. Az ittria sűrűsége 4,8-5,07 kg/dm^3, a kritikus feszültségintenzitási tényezője pedig 1,2-3,27 GPa értékek között mozog, a gyártási

folyamattól függően. A köbös ittria a fémekhez viszonyítva magasabb keménységgel (~2200-2800 HV), de alacsonyabb Young-modulusszal (146-168 GPa) rendelkezik, ezért a hajlító szilárdsága is alacsonyabb (15-140 MPa) [132]. Az ittrium-oxid a lantanida-oxidokhoz nagyon hasonló tulajdonságokkal rendelkezik, tehát kiváló leppelési segédanyag [131]. A fizikai tulajdonságai alapján az prognosztizálható, hogy az ittrium-oxid leppelő-polírozó mechanizmussal rendelkezhet abban az esetben is, ha egy tribológiai rendszerben köztes közeg adalékként alkalmazzák.

Az oxigén-aktív elemek, mint az ittrium, képes csökkenteni az oxidációs hajlamot. Wukusick tanulmánya [133] alapján az oxidált rétegen Y_2O_3 kerámia keletkeződhet és ez képes csökkenteni az oxidáció arányát a vizsgálati próbatesten abban az esetben, ha az ittriumot ötvözőként használják a fém-ötvözetben. Ezen vékony, ittria védőréteg növeli a próbatest felületén képződő természetes oxid-hártya keménységét, amely ezáltal a hőmérsékletnek és a terhelésnek jobban ellenállóvá válik és képes megakadályozni a felület töredezését.

Liu és Li [134] az ittrium-oxid kerámiával adalékolt kenőanyag korróziós hatásait vizsgálták meg úgy, hogy az elkészült kenőanyagba 10% kénsavat kevertek és ezekkel a mintákkal végeztek el hasáb-lemez tribológiai vizsgálatokat. A vizsgálati eredmények azt mutatják, hogy az ittria kerámia jótékony hatással van az anyagok korróziós kopással szembeni védelmére, amelyet pásztázó elektronmikroszkópos felvételekkel is bizonyítottak. A vizsgálati eredményeket azzal magyarázták, hogy az ittria kerámia fokozhatja a felület passzivációját és elősegíti a korróziós kopás során kialakult védő oxidfilm felületen való megtapadását.

He és társai [135] nanoméretű, síklap geometriájú ittria részecskékkel (lásd: 33. ábra) adalékoltak ásványi olajat és vizsgálták meg az olajminták reológiai és tribológiai tulajdonságait. Az eredmények alapján a 0,1 tömegszázalékos olajminta nevezhető optimálisnak, amely csekély viszkozitás csökkentést (5%) és jelentős súrlódáscsökkenést (40%) eredményezett. A tanulmányban elvégzett smoothed-particle hidrodinamikai alapú folyadékdinamikai szimuláció megerősítette az adalékolás okozta reológiai viselkedést. A tanulmányban a szerzők megemlítik, hogy a lapka geometriájú nanorészecskék geometriai irányultsága szintén befolyásoló tényező lehet a reológiai és tribológiai tulajdonságok magyarázatára irányulóan, amelyek további vizsgálata lehetőséget nyújthat a jövőbeli, következő generációs kenőanyagok megtervezésére és megértésére.



33. ábra: Transmissziós elektronmikroszkópos (TEM) felvétel a lemez formájú nanoméretű ittria szemcsékről [135]

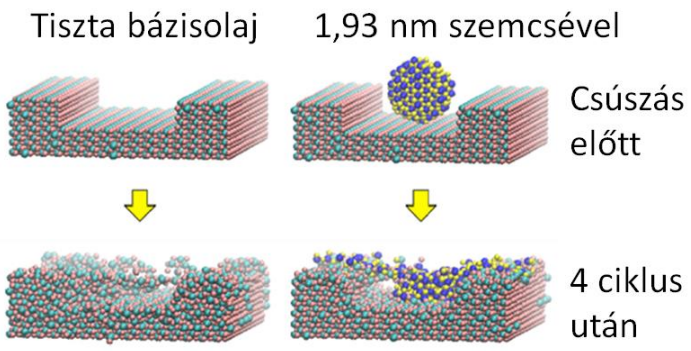
A tiszta ittrium-oxid nanokerámia egy olyan terület, amelyről a jelenlegi szakirodalom kevés szót ejt. Tribológiai szempontból a síklap geometriájú részecskéket vizsgálták meg, ígéretes, 40%-os súrlódáscsökkentéssel. A fellépő működési mechanizmus bizonyítása még hiányzik.

4.2. Számítógépes szimulációk alkalmazási lehetőségei és korlátai a tribológiai fejlesztések során

A mai mérnöki kutatásokban és fejlesztésekben egyre nagyobb szerepet játszanak a különböző szimulációs szoftverek. Ezek elsődleges célja a valós folyamatok modellezése és ezek segítségével költséghatékony módon lehet különböző elképzeléseket gyakorlati vizsgálatok nélkül elemezni. Különböző szimulációs szoftverek és vizsgálatok léteznek: mechanikai végeselem szimulációk, áramlástani szimulációk, többtest szimulációk vagy súrlódás szimulációk.

Tribológiai vonatkozásban a szimulációkat egyelőre még korlátozottan alkalmazzák. Az egyik ilyen szimuláció a hidrodinamikai szimuláció, amelyet elsősorban siklócsapágyaknál található olajfilm nyomáseloszlásának vizsgálatához használnak [136]. Az ilyen szimulációkkal olyan eredmények nyerhetők, amelyek a valóságban csak nagyon nehezen mérhetők, azonban fontos információként szolgálhatnak kenéstechnikai fejlesztésekhez.

Az úgynevezett molekuláris dinamikai (molecular dynamics – MD) szimulációk szintén fellelhetők az irodalomban. Peña-Parás és társai [40] nanoméretű TiO_2 szemcsék viselkedését modellezték, melynek eredményeit a 34. ábra ismerteti. Ez alapján úgy tűnik, hogy az 1050 HV keménységű TiO_2 nanorészecske széttöredezik a 127 HV keménységű, AISI 1018-as acélon, amely véleményem szerint nem feltétlenül fedi a valóságot. Az elemzett irodalmi forrásokban elvégzett gyakorlati mérések nem támasztják alá ezen szimuláció eredményeit [59].



34. ábra: Molekuláris dinamikai szimulációs eredmények nanométerű TiO_2 szemcsékkel adalékolt bázisolaj tribológiai tulajdonságaira ([40], szerzői módosítással)

A szimulációs szoftverek legnagyobb hátránya az, hogy amennyiben a program nem talál matematikailag problémás egyenletet, akkor valamilyen eredményt szolgáltat. Az eredmény valóságtartalmának megállapításához és kiértékeléséhez nagy szaktudás szükséges. Az egyes szimulációkat valamilyen formában a valósággal összehasonlítani, validálni szükséges annak érdekében, hogy az eredmény valóságtartalma bizonyított legyen.

A tribológiai szimulációs lehetőségek elemzése során megállapítható, hogy a jelenlegi szoftverekkel alapvető súrlódás szimulációk elvégezhetők, azonban a kopásszimuláció és a kenőolajban található nanorészecskék felülettel való interakciójának szimulációja és nem elegendően pontos és valósághű. A szimulációs lehetőségek korlátait figyelembe véve arra a következtetésre jutottam, hogy a jelenlegi legmegbízhatóbb kutatási módszer a gyakorlati súrlódás- és kopásvizsgálatok, például az egyszerűsített próbatesteket használó tribométerek alkalmazása.

4.3. A kutatás célkitűzései

Az irodalmi forrásokból nyert információk alapján az alábbi célkitűzéseket fogalmaztam meg:

1) A jelenleg is hatályos kenőolaj tribológiai összehasonlító szabvány (ISO 19291:2016) elemzése a motorolajok komplex igénybevételeinek figyelembevételével. További cél a szabvány beállítási paraméterei tribológiai eredményekre gyakorolt hatásainak vizsgálata, és egy stabil, alacsony szórásmezővel rendelkező vizsgálati módszer kifejlesztése, amely az olajok motorban tapasztalt folyamatait valósághűbben leképezi.

2) A nanométerű kerámia szemcsék kenőolajban történő homogenizálására nem található egy, a kutatók által széleskörben alkalmazott bekeverési folyamat, ezért jelen kutatásban célként tűztem ki, hogy egy megbízható, reprodukálható bekeverési folyamatot definiáljak.
3) A kiválasztott három nanométerű kerámia részecske (ZrO_2, CuO és Y_2O_3) kenőolajba homogenizált állapotban biztosított tribológiai tulajdonságainak és működési folyamatainak meghatározása.
   a) A cirkónium(IV)-oxid kerámia alacsony siklási tulajdonságú felületi bevonatként való alkalmazása alapján valószínűsítem, hogy a nanométerű ZrO2 szemcsék kenőolajban használva hasonló tulajdonságokat biztosítanak az egymáson elmozduló alkatrészek számára, mint az ugyanilyen anyagot is tartalmazó felületi bevonatok.
   b) Feltételezésem szerint a nanométerű réz(II)-oxid szemcsék a tribológiai vizsgálat során használt peremfeltételek mellett képesek elemi rézzé redukálódni, az olajmintát felépítő szénhidrogének képesek lehetnek oxigént elvonni a CuO nanorészecskéktől. Az így redukálódott réz az alacsony keménysége miatt fel fog kenődni az érintkező felületekre és ott tribológiai védőréteget képezve pozitívan fogja befolyásolni a rendszer súrlódási és kopási tulajdonságait. Véleményem szerint ezen feltételezés megfelelő tribológiai vizsgálatokkal bizonyítható.
   c) Meglátásaim szerint gyakorlati tesztekkel bizonyíthatom, hogy az ittrium(III)-oxid a kiváló polírozó tulajdonsága alapján mikroszkópikus szintű alakváltozást fog okozni az érintkező felületeken, amelyek a megfelelő nanorészecske-koncentráció mellett képesek lehetnek a tribológiai terhelés felületi eloszlását javítani növelve ezzel a rendszer terhelésfelvevő képességét és kopásállóságát.

5. Laboratóriumi vizsgálatokhoz alkalmazott berendezések

A kiválasztott laboratóriumi vizsgálatokat a Belsőégésű Motorok és Járműhajtások Tanszékének Tribológia laboratóriumában található Optimol SRV®5 típusú tribométer felhasználásával végeztem, egy golyó-tárcsa alternáló mozgást megvalósító tribológiai rendszer segítségével.

A tribológiai vizsgálatokhoz szükséges kísérleti olajminták pontos adalék-koncentrációjának beállításához egy Kern KB típusú mikromérleget használtam, amely 0,001 g pontossággal rendelkezik. Az elkészített adalék-olaj minták homogenitásának biztosítása érdekében egy HI 190M típusú mágneses keverőgépet és egy Bandelin Sonorex típusú ultrahangos homogenizáló berendezést alkalmaztam.

A vizsgálati próbatesteken keletkező kopás jellemzésére különböző típusú mikroszkópokat használtam, amelyek alkalmasak a keletkezett kopás valamely tulajdonságának (például kopásátmérő, kopástérfogat) megállapítására. A keletkezett kopásképek befoglaló méreteinek meghatározásához Keyence VHX-1000 digitális mikroszkópot használtam. A tárcsa felületén keletkezett kopás 3-dimenziós felületanalízise érdekében Leica DCM 3D típusú konfokális mikroszkópot használtam, amely alkalmas keresztmetszeti profilok és kopástérfogati értékek meghatározására.

A vizsgálatok során kiemelt fontossággal bírt a nanoméretű kerámiaszemcsék kopási mechanizmusra gyakorolt hatásainak, illetve a szemcsék működési folyamatainak meghatározása. Ezen elemzéshez elengedhetetlen a megfelelően nagy nagyítású felvételek készítése, amely pásztázó elektronmikroszkópok segítségével megvalósíthatók. A felvételek elkészítésére egy Hirox SEM 4000M mikroszkópot használtam, amely egy elemösszetétel meghatározására alkalmas EDX szenzorral is fel van szerelve. További, nagyobb nagyítású felvételek elkészítésére a Miskolci Egyetem 3D laboratóriumában található Thermo Scientific Helios G4 PFIB CXE elektronmikroszkópot alkalmaztam. További elemzés céljából a debreceni Atommagkutató Intézetben található Spect fotoelektron-spektrométer (XPS) használatára nyílt lehetőségem.

6. Vizsgálati módszerfejlesztés kenőolajminták tribológiai tulajdonságainak valósághű elemzése érdekében

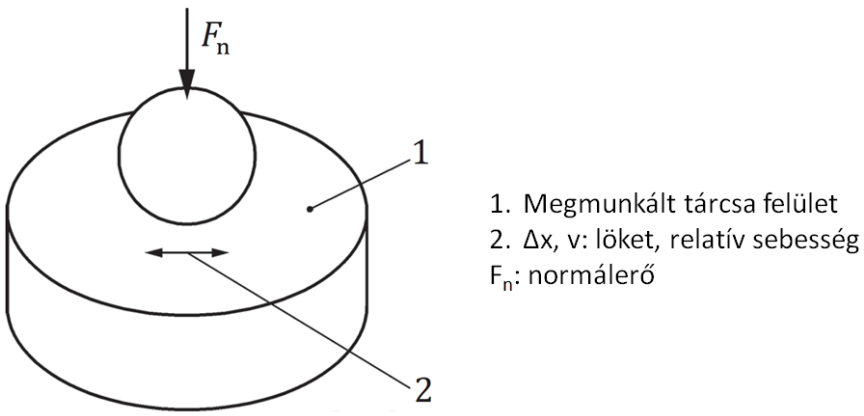
A kenőolajok súrlódási és kopási tulajdonságainak vizsgálatára különböző vizsgálati módszerek léteznek. Egyes szabványok különböző vizsgálati módszereket és metódusokat ismertetnek annak érdekében, hogy a felhasználásukkal elvégzett mérések megfelelő pontosságúak és megfelelően összehasonlíthatóak legyenek.

A nemzetközi szabvány vizsgálatához és a további módszerfejlesztéshez egy Castrol EDGE 5W-30 C3 típusú motorolajat alkalmaztam, amely egy széles körben elterjedt, több autógyártó szabványát birtokló motorolaj [137].

6.1. ISO 19291:2016 kenőolaj tribológiai vizsgálatok szabványa

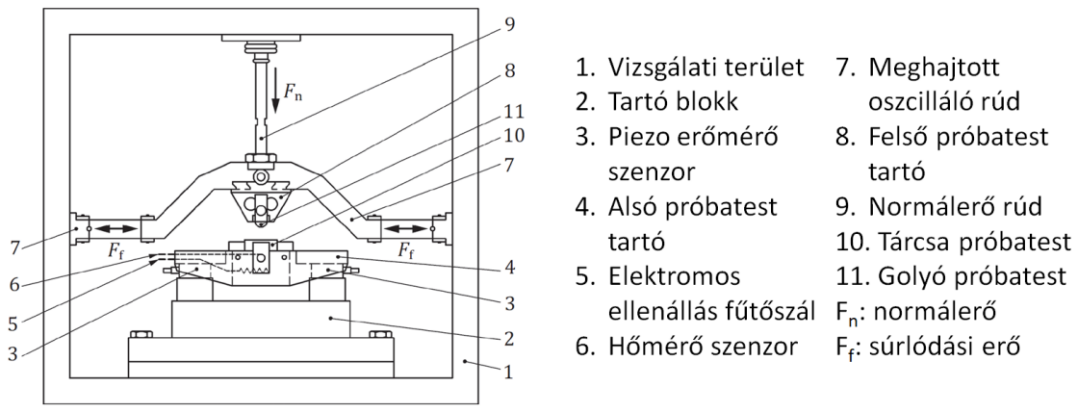
A jelenleg is érvényben lévő ISO 19291:2016-os szabvány a kenőolajok és kenőzsírok tribológiai tulajdonságainak vizsgálatával foglalkozik. A szabvány négy részre osztható: kenőolajok súrlódási és kopási elemzése, kenőolajok extrém nyomásnak ellenálló képességének elemzése, kenőzsírok súrlódási és kopási elemzése, illetve kenőzsírok extrém magas nyomásnak ellenálló képességének elemzése. Az egyes részek a legtöbb esetben megegyeznek, a különbséget a vizsgálati paraméterek jelentik. Az ISO 19291:2016-os szabvány számos másik szabvánnyal harmonizál, amelyek meg is jelennek a szabvány szövegezésében, mint például: DIN51834-2, ASTM D6425.

A szabvány alapvetően egy alternáló mozgást végző vizsgálati rendszer, a vizsgálatokhoz használt próbatestek egy csapágyacélból készült golyó, illetve egy csapágyacélból készült síkfelületű tárcsa. A szabvány egyértelműen meghatározza a használható tisztító vegyszereket is: nem-klórozott és nem-filmképző, szénhidrogén-alapú tisztító vegyszer DIN 51631:1999 type 2 (megújítva DIN 51631:2019) szabvány alapján. A szabvány példát is említ, a CAS 64742-49-0 számú vegyszer, a petroléter megfelel erre a felhasználásra.



35. ábra: ISO 19291:2016 szabványban ismertetett vizsgálati próbatestek ([65], szerzői módosítással)

A vizsgálati berendezés kiemelt részletességgel ismertetett, amelyet sematikusan a 36. ábra mutat. A berendezés tartalmaz egy úgynevezett vizsgálati kamrát (36. ábra, 1, továbbiakban csak az alkatrész sorszáma kerül ismertetésre), ahova el kell helyezni a golyó (11) és tárcsa (10) próbatesteket a számukra elkészített befogókkal (4, 8). Az alternáló mozgást egy elektromágneses elven működő lineáris motornak kell biztosítani, integrált löketmérő szenzorral. A vizsgálathoz szükséges normálerőt egy szervomotor és egy terhelő tengely (9) segítségével kell realizálni. Az alsó próbatest tartó blokk (2) egy termosztatikusan monitorozott elektromos ellenállásos fűtőelemmel ellátott alkatrész. A rendszer további különböző elektromos vezérlő egységgel van ellátva (meghajtás, terhelés, hőmérséklet, frekvencia, löket), és tartozik hozzá egy speciális vezérlő szoftver is. A vizsgálatok során az érintkező felületek között keletkező súrlódási erőt egy piezo-elektromos szenzor méri folyamatosan, amely szenzor az alsó próbatest tartó blokkban (2) került elhelyezésre. A szabvány leírja, hogy a vizsgálat során keletkező kopás mérhető egy teljes lineáris kopásmérővel, illetve a mérés után a kopás számszerűsíthető mikroszkópos úton.



36. ábra: ISO 19291:2016 szabványban ismertetett vizsgáló berendezés sematikus ábrája ([65], szerzői módosítással)

A vizsgálatokhoz használandó próbatesteknek szigorú előírásoknak kell megfelelniük. A szabvány által előírt adatokat (méret, anyagminőség, keménység, felületi érdesség, hőkezeltségi állapot és megmunkálás) a 3. táblázat és a 4. táblázat ismerteti. A szabvány továbbá részletesen ismerteti a felületi topográfia mérésére szolgáló folyamat szükséges paramétereit is.

3. táblázat: Vizsgálati golyó próbatest előírása ISO 19291:2016 alapján ([65], szerzői módosítással)

Paraméter	Átmérő	Anyagminőség	Keménység	Ra érdesség
Érték	10 mm	100Cr6 (1.3505)	(60 ± 2) HRC	0,025 ± 0,005 µm

4. táblázat: Vizsgálati tárcsa próbatest előírása ISO 19291:2016 alapján ([65], szerzői módosítással)

Paraméter	Méret [mm]	Anyag-minőség	Hőke-zelés	Kemény-ség	Megmun-kálás	Érdesség [µm]
Érték	átmérő 24 ± 0,5	100Cr6 (1.3505)	Edzett	710-820 HV0,2	Leppelés	$0,5<R_z<0,65$
						$0,035<R_a<0,05$
	magasság 7,8 ± 0,1	vákuumban újraolvasztott		62 HRC ± 1 HRC		$0,02<R_{PK}<0,035$
						$0,05<R_{VK}<0,075$

A vizsgálati paramétereket tekintve a szabvány pontos értékeket határoz meg:

- Hőmérséklet: 50°C, 80°C vagy 120°C
- Löket: 1,0 mm
- Az oszcilláló mozgás frekvenciája: 50 Hz
- Bejáratási szakasz során használt terhelés: 50 N
- Bejáratás ideje: 30 másodperc
- Vizsgálat időtartama alatt használt terhelés: 300 N
- Vizsgálat ideje a bejáratás után: 2 óra

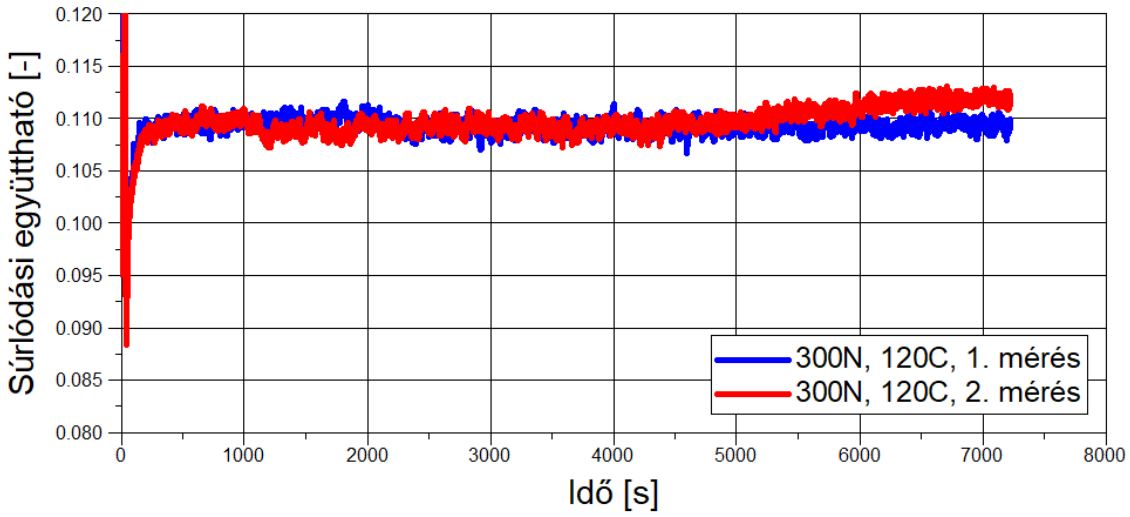
A szabvány világosan kimondja, hogy a tribológiai vizsgálat csak megfelelő hőmérséklet-kondicionálás után kezdhető meg, amelynek időtartama 5 perc ± 1 perc.

A mérés elindítása mindig egy vizuális ellenőrzéssel történik, amely során a gépkezelő megbizonyosodik arról, hogy a berendezésen nincsen látható sérülés. A vizsgálati próbatesteket ultrahangos tisztítóberendezésben kell tisztítani a szabványnak megfelelő kémiai tisztítószerrel. Tisztítás után a golyó próbatestet a felső próbatest tartóba (8) kell helyezni, majd a szorító csavart 0,1 Nm-es nyomatékra húzni. A tárcsa próbatestet ezután helyezzük az alsó próbatest befogóba (4), és a hozzá tartozó csavart szorítjuk meg 0,1 Nm-es nyomatékkal. A kenőolaj mintát a következő lépésben helyezzük a tárcsa próbatestre 0,3 ml mennyiségben, tiszta pipetta alkalmazásával. A felső próbatest befogó a golyó próbatesttel behelyezésre kerül a számára kialakított befogási helyre, és a szorító csavart 2 Nm-es nyomatékkal kell megfeszíteni. A beszerelés után egy 50 N-os előterhelést kell eszközölni, amely során a golyó és a tárcsa próbatest egymáshoz nyomódik. Az előterhelés realizálása után a golyó és a tárcsa próbatest megszorító csavarját meg kell lazítani, majd azonnal 2-2,5 Nm-es nyomatékkal megfeszíteni. A vizsgálati program betöltése után következik a kezdeti hőmérsékleti paraméter kondicionálása, azután pedig indítható az automatizált vizsgálat.

Az automatizált tribológiai vizsgálat után szükséges a próbatesteken keletkezett kopás számszerűsítése. A vizsgálatok előtt a korábban ismertetett módon a próbatestek megtisztítása szükséges. A mérést a mozgási iránnyal párhuzamosan és merőlegesen is el kell végezni, 0,01 mm-es pontossággal, majd a kapott d_1 és d_2 értékeket átlagolni kell. További kopás térfogat meghatározására is van lehetőség, a szabvány két másik szabványra utal ez esetben, az ASTM D7755-re és a DIN 51834-3-ra.

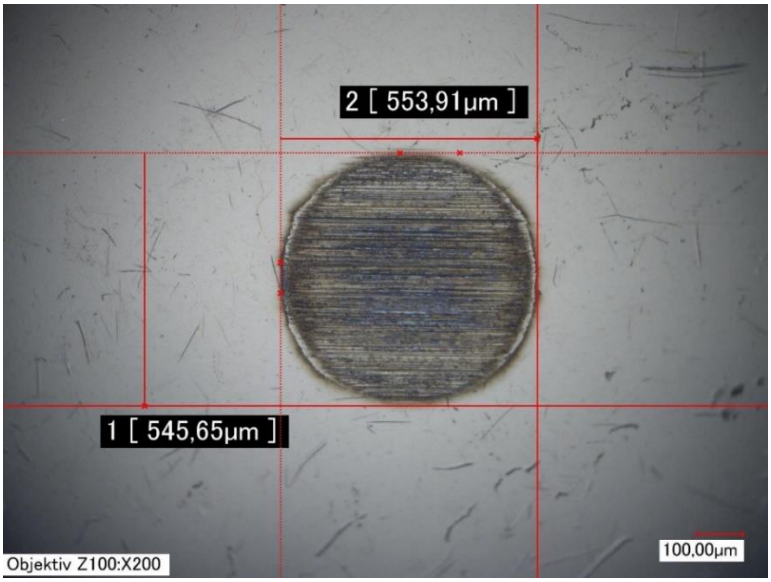
6.2. Castrol 5W-30 típusú motorolaj szabványos tribológiai vizsgálata

A szabvány alapján elvégzett vizsgálatok súrlódási együttható eredményeit a 37. ábra ismerteti. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a mért súrlódási együttható értékek egy csekély, de folyamatosan emelkedő tendenciát mutatnak, amely eltér attól, ami egy megfelelően működő tribológiai rendszer esetén elvárt. Egy belsőégésű motor esetén a súrlódási veszteségek a bejáratási szakasz során folyamatosan csökkenő tendenciát mutatnak, amely arra utal, hogy az érintkező felületek folyamatosan összekopnak, a kontaktfelület nagysága növekszik. Az idő előrehaladtával a súrlódási veszteségek stabilizálódnak és egészen a rendszer tönkremeneteléig egy stagnáló tendenciát mutatnak. Az ilyen tendencia a szabvány alapján elvégzett mérések eredményein nem megfigyelhető.



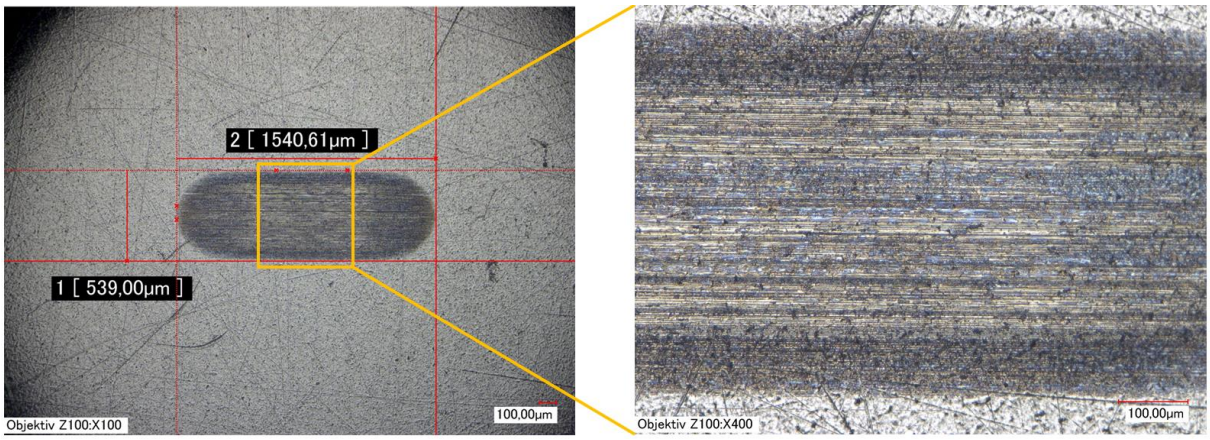
37. ábra: ISO 19291:2016 szabvány alapján elvégzett vizsgálatok súrlódás-eredményei Castrol 5W-30 típusú sériaolajjal

A tribológiai vizsgálatok során a szabványban ismertetett kopásképe befoglaló méreteinek mérése is megtörtént, amelynek eredményét a 38. ábra ismerteti. A felvételeket és a felvételeken látható méretmeghatározást egy Keyence VHX-1000 típusú digitális mikroszkóppal és a hozzá tartozó 100x-os objektív felhasználásával végeztem el. Az ábráról megállapítható, hogy a kopásnyom egyenletes, közel szabályos kör formájú. A kopásképen megfigyelhető a tribológiai vizsgálat mozgásiránya is, hiszen a képen látható abrazív karcolások ezt egyértelműen jelzik.



38. ábra: ISO 19291:2016 szabvány alapján elvégzett vizsgálatok kopás-eredményei Castrol 5W-30 típusú szériaolajjal

Továbbiakban a tárcsa próbatesten keletkező kopásról is készítettem megfelelő nagyítású felvételeket (39. ábra) és az ott megfigyelhető befoglaló méreteket szintén meghatároztam. A golyó és tárcsa próbatesteken megfigyelhető kopáskép elemzése során megállapítottam, hogy a golyón található kopásnyom átlagos átmérője megegyezik a tárcsán található nyom szélességével. A megfigyelhető minimális eltérések mérési pontatlanságból adódnak. A méretek egyezősége az elvárásoknak megfelelt. Azonban a tárcsán keletkezett kopás mélyebb elemzése során megfigyelhető egy olyan kopási sáv, ahol megégett olaj (kék színű területek), illetve összehegedéses kopás nyomai figyelhetők meg. Egy megfelelően üzemelő kenőolaj esetén kiemelt fontosságú az érintkező felületek összehegedésének megakadályozása, ezért felmerül a kérdés, hogy miért történt így egy szériában gyakran használt, új állapotban lévő kenőolaj esetén.



39. ábra: ISO 19291:2016 szabvány alapján elvégzett vizsgálatok során, a tárcsa próbatesten keletkezett kopás elemzése digitális mikroszkóppal

A szabvány alapján elvégzett mérések eredményeiből azt a következtetést lehet levonni, hogy a vizsgálat során a tribológiai rendszer túlterhelődött és ezen túlterhelés hatására a súrlódás során keletkező hőmennyiség elősegítette a vizsgálat során használt olaj megégését, illetve az érintkező felületeken tapasztalható összehegedéses kopás létrejöttét. Az eredmények alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a kenőolajok tribológiai tulajdonságainak mérésére szolgáló szabványos vizsgálat belsőégésű motorolajok vizsgálatánál nem kellő pontosságú, a tribológiai vizsgálat során fellépő folyamatok nem szimulálják megfelelően a belsőégésű motorokban megfigyelhető folyamatokat. Az eredmények alapján felmerült az igény egy olyan vizsgálati módszer kifejlesztésére, amely alkalmas belsőégésű motorolajok tribológiai tulajdonságainak valósághű jellemzésére alkalmas.

6.3. Vizsgálati módszer fejlesztés Castrol 5W-30 típusú motorolaj tribológiai tulajdonságainak elemzésére

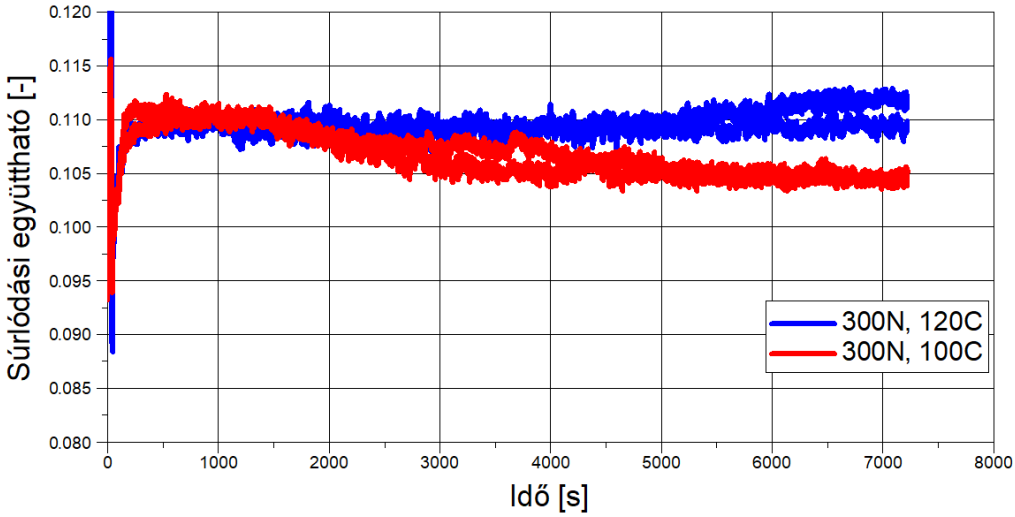
Az Optimol SRV®5 tribométerrel elvégzett, a 6.2. fejezetben ismertetett szabványos vizsgálati módszer felhasználása során megtapasztalt hiányosságok megoldására egy olyan átfogó módszerfejlesztési vizsgálati sorozatot végeztem el [138], amely során a tribológiai vizsgálati módszer egyes beállítási paramétereinek hatását vizsgáltam. Az egyes paramétereket megfelelően széles tartományban megvizsgáltam, amely során az egyes paramétereknél az az érték került véglegesítésre, amely során az eredmények a legalacsonyabb szórásmezőt biztosítják, illetve a kopásképeken tapasztalt jellemző kopási mechanizmusok leginkább megfelelnek a belsőégésű motorban tapasztaltaknak. A 5. táblázat ismerteti a módszer fejlesztés során vizsgált beállítási paramétereket és azok értékét.

5. táblázat: A vizsgálati módszer fejlesztés során alkalmazott beállítási paraméterek táblázata

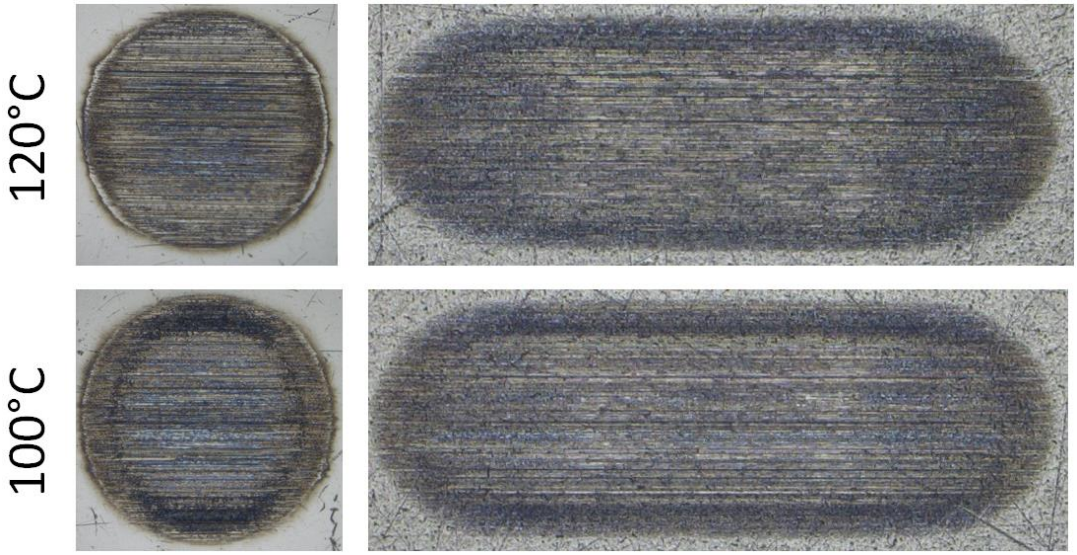
Vizsgált beállítási paraméter	Vizsgált értékek
Vizsgálati hőmérséklet	75, 100, 120 és 150°C
Terhelő erő	100, 150, 200 és 300 N
Vizsgálati idő	0,5; 1; 5; 10; 15; 30; 60; 120 perc
Kenési rendszer	0,3 ml egyszeri hozzáadás és 225 ml/h folyamatos keringtetés
Motorolaj típus	Castrol 5W-30 és Shell 0W-30

6.3.1. A vizsgálati paraméterek hatásainak elemzése

Első lépésként a szabványos erőérték mellett (300 N) a vizsgálati hőmérsékletet csökkentettem 100°C-ra a felületen tapasztalható olajráégés és adhéziós kopás kiküszöbölése érdekében. A 100°C-os érték korábbi tapasztalati érték, illetve a belsőégésű motorokban használt olajok átlagos üzemi hőmérséklete is ezen érték. A súrlódásvizsgálat eredményét a 40. ábra mutatja. Ez alapján megállapítható, hogy a mért súrlódási együttható időbeli lefutása közelebb áll az ideálishoz: a görbe a bejárási szakaszban kissé csökkenő tendenciát mutat, majd kiegyenesedik. A kopásképek szintén pozitív irányban változtak (41. ábra), a felületre ráégett olaj aránya is csökkent. Az ISO 19291:2016 szabvány által előírt két, egymástól függetlenül elvégzett mérések eredményeiben megfigyelhető szórásmező is megfelelően alacsony, amely a vizsgálati berendezések pontosságával és a vizsgálati módszer hatékonyságával magyarázható. Azonban az adhéziós kopás nyomai, illetve a ráégett olaj mennyisége nem tűnt el teljesen, így a vizsgálati módszer továbbfejlesztése megalapozott. A további vizsgálatokhoz a vizsgálati hőmérsékletet 100°C-ban határoztam meg.



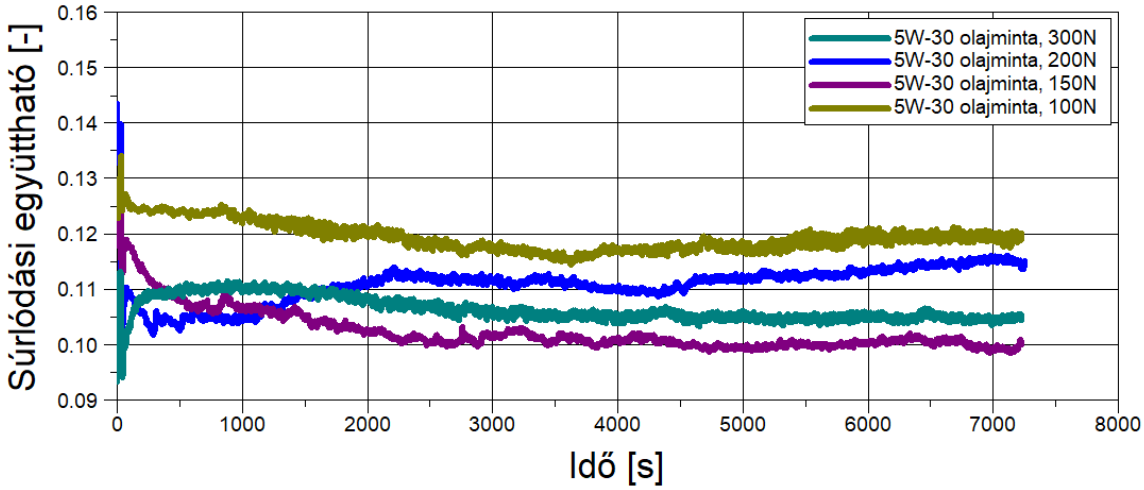
40. ábra: Castrol 5W-30 szériaolajjal elvégzett, 100°C-os és 120°C-os súrlódási eredményei



41. ábra: Castrol 5W-30 szériaolajjal 100°C és 120°C-os hőmérsékletekkel elvégzett tribológiai vizsgálatok kopásképe, 200x-os nagyítás

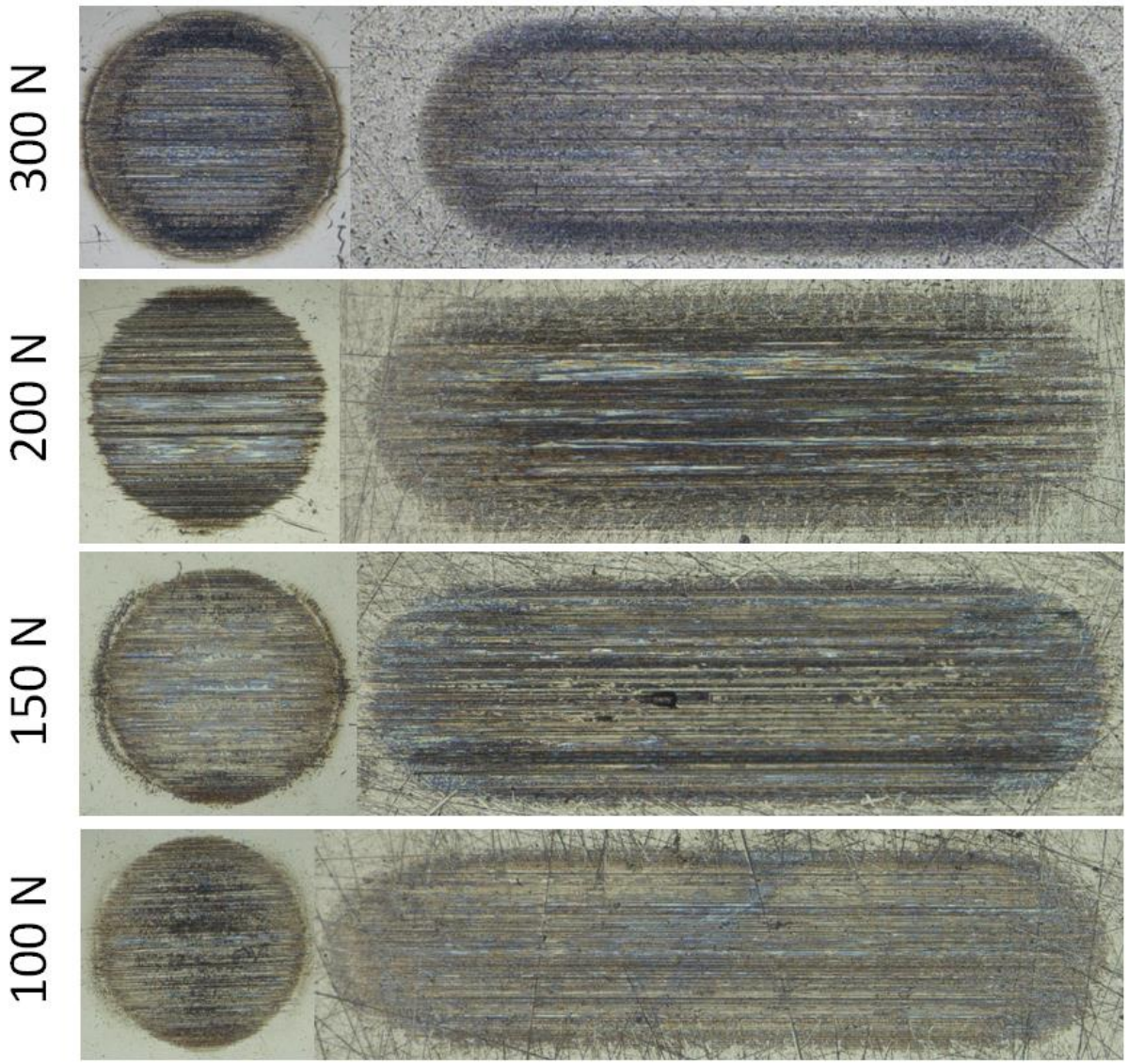
<u>Terhelőerő vizsgálati eredményekre gyakorolt hatása</u>

A továbbiakban 4 különböző terhelési szintet vizsgáltunk meg azonos feltételek mellett, a normálerő paraméter változtatásával. A vizsgálatok során minden munkaponton legalább 3 különálló mérés került elvégzésre. A vizsgálatok eredményeit a 42. ábra ismerteti. Az eredmények alapján megállapítható, hogy egy belsőégésű motorban használatos kenőolaj esetén mind a túl alacsony, mind a túl magas terhelés káros hatással van a súrlódási együttható időbeli lefutására. A 150 N-os terhelés során mért súrlódási együttható görbe ígéretes tendenciát mutat, a kisebb ingadozásoktól eltekintve a görbe időbeli lefutása megfeleltethető az elvárásoknak.



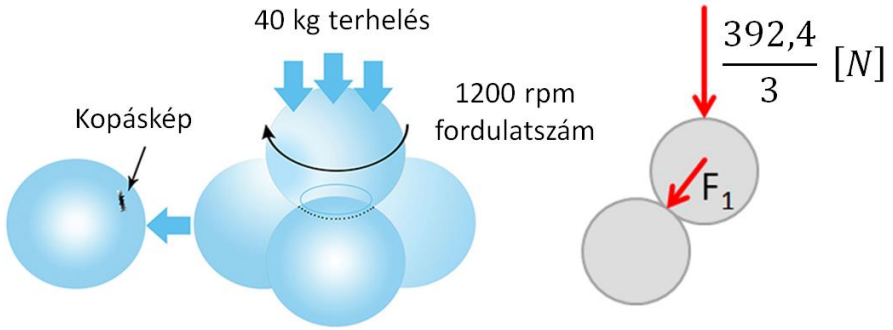
42. ábra: Castrol 5W-30 szériaolajjal 100°C-on és 0,3ml olajmennyiséggel elvégzett terhelésvariációs súrlódásmérési vizsgálatainak eredményei

A kopásképek elemzése (43. ábra) alapján megállapítható, hogy tisztán a terhelési paramétert figyelembe véve a 300 N-os érték biztosítja a legkedvezőbb kopási tulajdonságokat. Azonban a súrlódási együttható időbeli lefutását is figyelembe véve ez a tendencia már nem annyira egyértelmű, hiszen a 150 N-os eredmény is ígéretes tendenciát mutat. A vizsgálatok során keletkezett kopásképek elemzése feltárta, hogy a terhelés csökkentése önmagában nem elegendő a megfigyelt túlzott olajráégés és összehegedéses kopás kiküszöbölésére.



43. ábra: Castrol 5W-30 szériaolajjal 100°C-on, 0,3 ml olajmennyiséggel 4 terhelési szinten elvégzett vizsgálatok digitális mikroszkópos kopásképei, 200x-os nagyítással

A végleges terhelési szint megválasztásához további adatokat is figyelembe vettem. Létezik egy ASTM D417-20-as szabvány [139], amely kenőolajok és kenőzsírok terhelhetőségi és kopásgátló vizsgálataihoz használható. A szabvány fél colos (12,7 mm) csapágygolyók használatát írja elő, amelyeket szabályos tetraéder formában kell elhelyezni, ahogyan azt a 44. ábra szemlélteti. A szabványos vizsgálatok során a használt terhelés 40 kg-nak feleltethető meg, amely 392,4 N erővel egyenértékű. A két vizsgálati módszer összehasonlítása érdekében a két érintkező golyó próbatest között fellépő erőt szükséges meghatározni, ahogy azt a 44. ábra F_1 erővel is ábrázol.

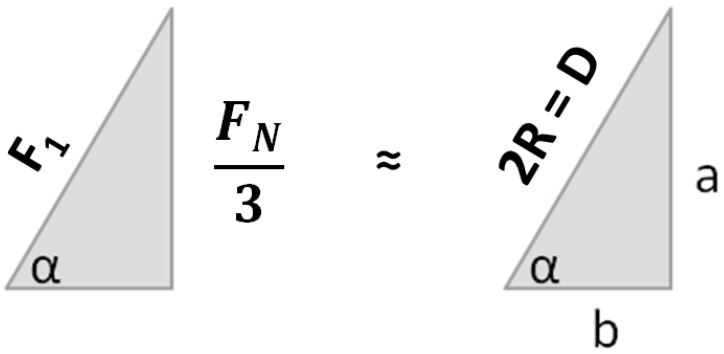


44. ábra: Az ASTM D4172-20-as szabványa alapján elvégezhető, kenőolaj terhelhetőségi vizsgálatok sematikus ábrája (bal, [139]), illetve a számításokhoz használt sematikus ábra (jobb)

A számítások elsődleges alapja a hasonlósági törvény, amely alapján az erők eloszlása és a golyók geometriája egymáshoz hasonló (45. ábra). A négy golyó egy szabályos tetraéder csúcspontjaiban helyezkedik el. A számításokhoz az alábbi hasonlósági törvény írható fel.

$$\frac{F_1}{F_N/_3} = \frac{2R}{a} \tag{4.1}$$

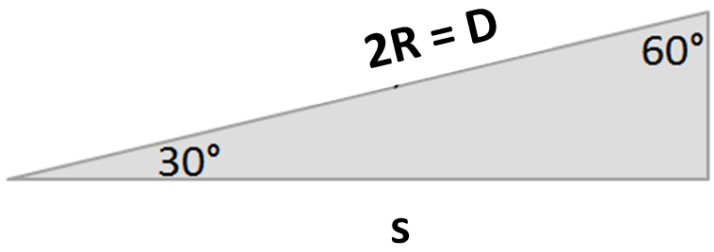
ahol F1 a két golyó érintkezésénél fellépő erő, F_N a terhelő erő, R a golyók sugara, a pedig tetraéder magassága.



45. ábra: A számításokhoz használt hasonlósági törvény

A hasonlósági egyenlet megoldásához az *a* oldal megadása szükséges, amely kiszámításához a Pitagorasz-tétel, illetve az egy síkban elhelyezkedő golyók középpontja által kialakított szabályos háromszög súlyvonala szükséges. A szabályos tetraéder tulajdonsága, hogy fentről nézve a tetraéder csúcspontja egybeesik az egy síkban lévő golyók középpontja által alkotott szabályos háromszög súlypontjával. A *2R* oldalhosszúságú szabályos háromszög

esetén a súlyvonal hossza kiszámolható (46. ábra), és a súlypont a súlyvonalat 2:1 arányban osztja el úgy, hogy a hosszabbik oldal a csúcspont felé néz. A háromszög súlyvonalának hossza (s), és ebből a b oldal hosszúsága a 4.2. és 4.3. egyenlet alapján számolható.



46. ábra: A szabályos háromszög súlypont hosszának meghatározása szögfüggvények alapján

$$s = D \cdot \cos 30° \tag{4.2}$$

$$b = \frac{2}{3} \cdot D \cdot cos\, 30° \tag{4.3}$$

Pitagorasz-tétel segítségével a 45. ábra által ismertetett háromszögből az a oldal számítható:

$$a = \sqrt{D^2 - b^2} = \sqrt{D^2 - \left(\frac{2}{3} \cdot D \cdot \cos 30°\right)^2} \tag{4.4}$$

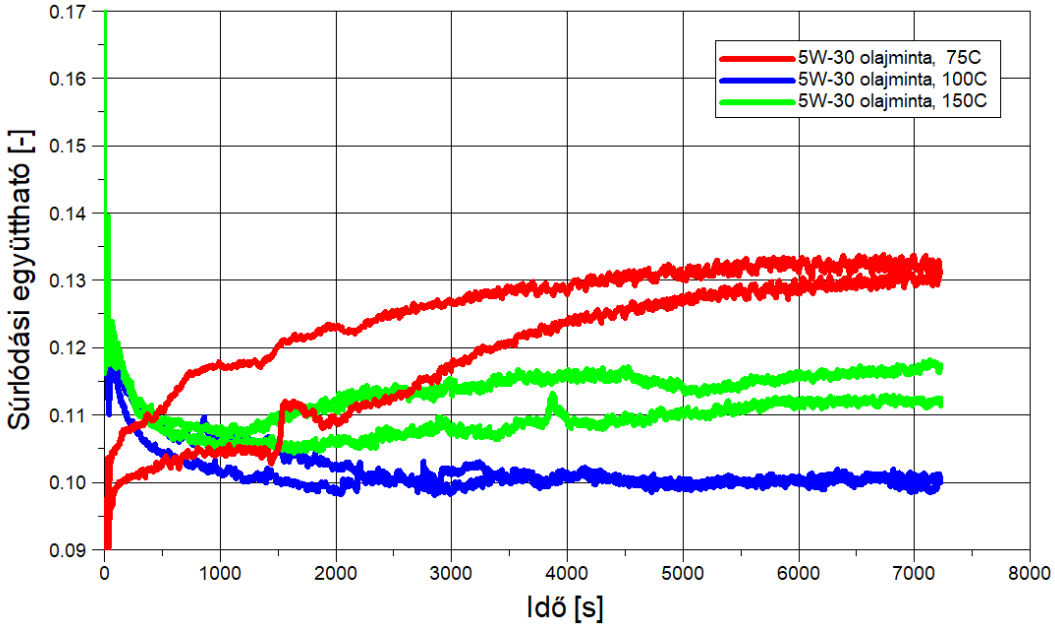
A számítások alapján a két golyó érintkezési pontjában a sugárirányban fellépő erő:

$$F_1 = \frac{F_N}{3} \cdot \frac{D}{a} = \frac{F_N}{3} \cdot \frac{D}{\sqrt{D^2 - \left(\frac{2}{3} \cdot D \cdot \cos 30°\right)^2}} = 160{,}2\ N \tag{4.5}$$

Az elvégzett számítások alapján a négy golyós szabványos vizsgálatok esetén a két golyó próbatest érintkezési pontjában fellépő radiális irányú erő értéke 160,2 N-ra adódott. A tribométerrel elvégzett terhelés-összehasonlító vizsgálatok eredményei, illetve a négy golyós szabványos vizsgálatok esetén elvégzett számítások alapján a 150 N-os terhelés megfelelő paraméter a további vizsgálatokhoz, ezért a többi vizsgálati paraméter tribológiai hatásainak elemzése során a terhelés 150 N-ban meghatározott.

Hőmérséklet vizsgálati eredményekre gyakorolt hatása

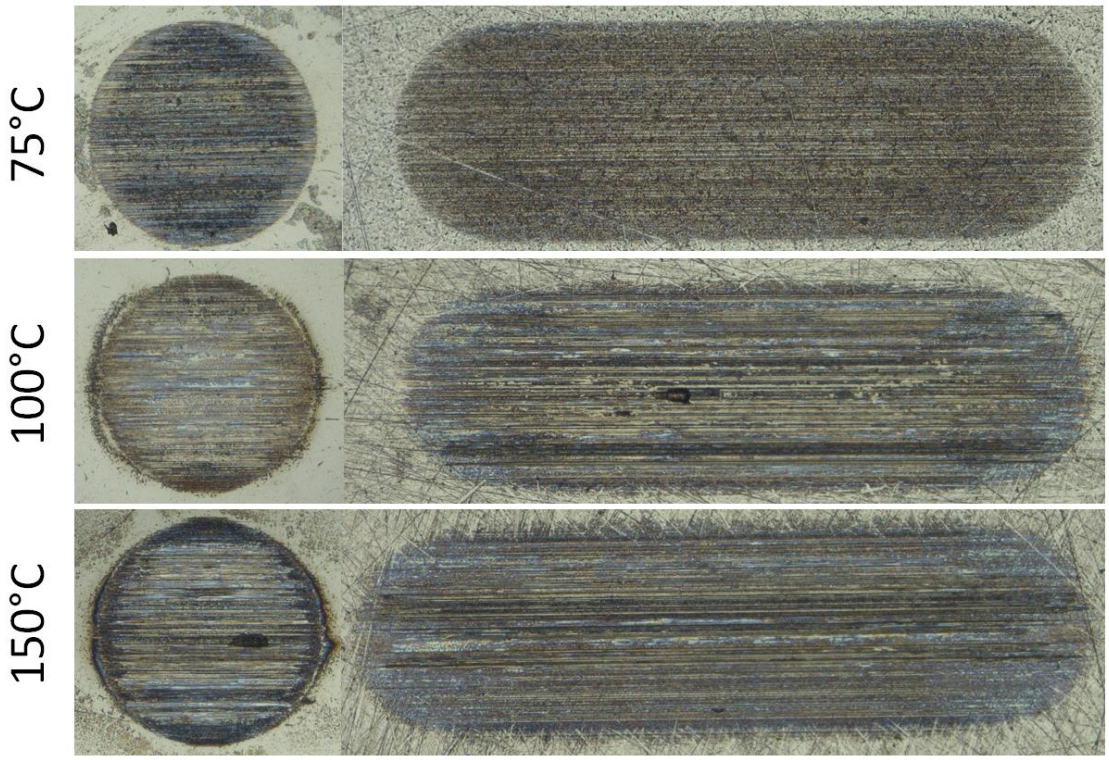
Következő lépésként a vizsgálati hőmérséklet súrlódásra és kopásra gyakorolt hatását vizsgáltam meg. A vizsgálatok elsődleges célja a próbatesteken keletkező összehegedéses kopás és a felületre ráégett olaj csökkentése. A referenciaként használt 100°C-os vizsgálatokon túl két hőmérsékleti paraméterrel végeztem el méréseket, 75°C és 150°C értékekkel. A 75°C-os hőmérsékleti érték a belsőégésű motor felmelegedési fázisa során tapasztalható érték, míg a 150°C egy lokálisan túlterhelt olajállapotnak feleltethető meg. A berendezés a vizsgálandó próbatesteket a tárcsa próbatest alatt található fűtőtesten keresztül kondicionálja.



47. ábra: Castrol 5W-30 szériaolajjal 150 N erővel és 0,3 ml olajmennyiséggel különböző hőmérsékleteken elvégzett súrlódásmérési vizsgálatok eredményei

A 47. ábra által bemutatott eredmények alapján megállapítható, hogy mind az alacsony (75°C), mind a magas (150°C) hőmérséklet kedvezőtlenül hat a súrlódásmérési vizsgálatok eredményeire, illetve az ismétlő mérések során megfigyelhető szórásmezőre. A kenőolajban található adalékok jelentős része csak egy adott hőmérséklet felett aktiválódik kémiailag, vagy a tervezett hatásukat nem elég hatékonyan fejtik ki alacsonyabb hőmérsékleten, amely egyértelműen látszik a 75°C-os vizsgálatok eredményein. A tervezettnél magasabb hőmérséklet a kenőolaj viszkozitására van káros hatással, hiszen a viszkozitás magas hőmérséklet hatására lecsökken és ezáltal nem képes megfelelő vastagságú védőréteget képezni az érintkező felületek között. Továbbá fennáll a veszélye annak, hogy a kenőolaj a túlságosan magas hőmérséklet hatására lokálisan megég, és ezáltal jelentősen romlik a

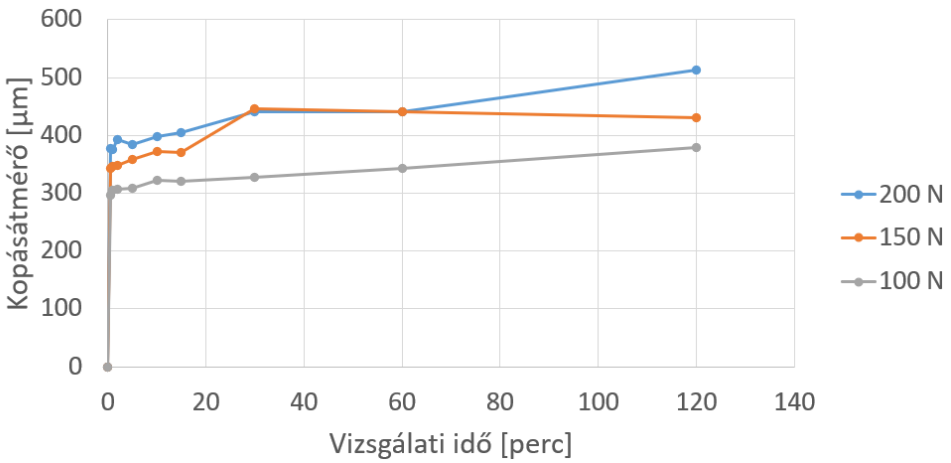
tribológiai teljesítménye. A 150°C-on elvégzett vizsgálatok eredményei alapján megállapítható, hogy a görbék folyamatosan emelkedő tendenciát mutattak, tehát a tribológiai rendszer túlterhelődött, amely a túl magas hőmérsékletnek tulajdonítható. Az eredmények megfeleltethetők egy valóságos üzemnek is, hiszen a valóságban egy túlterhelődött állapotban (például siklócsapágyak esetén) 140-150°C közötti érték is tapasztalható és ezeken a hőmérsékleteken már sok esetben felléphet a magas hőmérséklet okozta károsodás. A 48. ábra által ismertetett kopásképek alapján a súrlódásvizsgálatok eredményei megerősíthetők: az alacsony hőmérséklet nem okozott akkora hőterhelést az érintkező felületnek, mint a magas. A 150°C-os mérés okozta kopás az adhézió jeleit mutatja, amely a vizsgálati módszerrel szemben támasztott követelményeknek így nem felel meg. Az alacsony hőmérsékletű vizsgálat okozta kopáskép jelentősen csekélyebb terhelést okozott az érintkező felületeknek, azonban a mért súrlódási együttható olyan szintű emelkedő tendenciát mutat, amely szintén nem felel meg a követelményeknek. Az eredmények összegzése alapján megállapítható, hogy az eddig használt 100°C-os hőmérsékleti paraméter megváltoztatása nem indokolt.



48. ábra: Castrol 5W-30 szériaolajjal 150 N-on, különböző hőmérsékleteken elvégzett vizsgálatok digitális mikroszkópos kopásképei, 200x-os nagyítással

Vizsgálati idő hatása a mérések eredményeire

A vizsgálati idő a tribológiai vizsgálatok egyik legfontosabb paramétere. A vizsgálati idő csökkentésével megnövelhető az egységnyi időtartam alatt elvégezhető mérések száma, azonban a nagyon rövid mérés során nem feltétlen alakulhatnak ki azok a folyamatok, amelyek megfelelően vizsgálhatók. A vizsgálati idő kopásátmérőre gyakorolt hatása szintén elemzésre került a módszerfejlesztés méréssorozatban, az eredményeket a 49. ábra ismerteti. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a három különböző terhelésen a kopás időbeli lefutása hasonló tendenciát mutat. A görbék esetén fellelhető kismértékű csökkenés néhány helyen, amely a mérési pontatlanságból adódik, ezen értékek stagnálónak tekinthetők (az ISO 19291:2016-os szabvány szerint a kopásátmérő szórása maximum 60 µm). Az eredmények alapján nem jelenthető ki megfelelő biztonsággal, hogy a szabvány által megállapított 2 órás intervallum csökkentése szükséges, ezért a továbbiakban kétórás mérések kerültek rögzítésre.



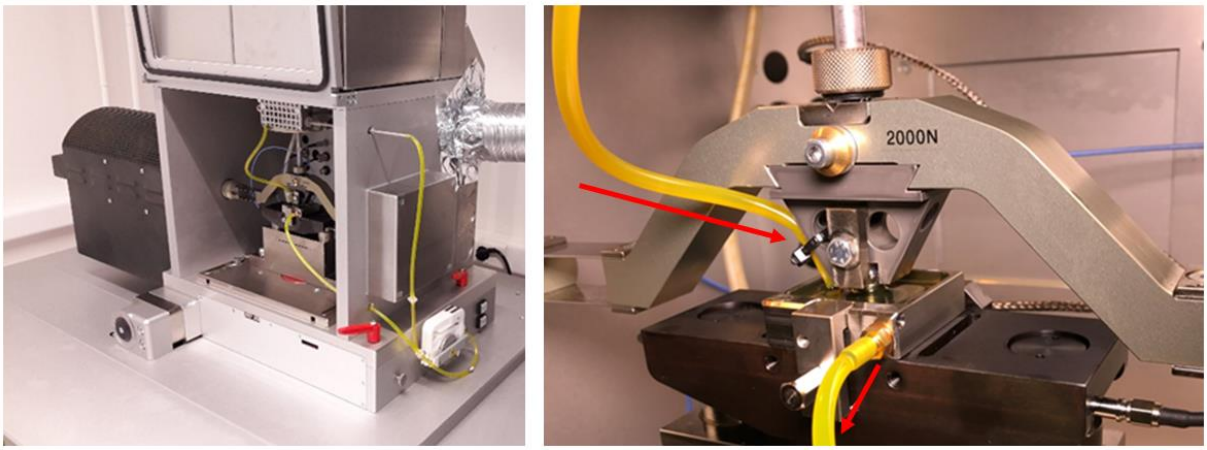
49. ábra: Castrol 5W-30 szériaolajjal 100°C-on és 0,3 ml olajmennyiséggel elvégzett időtartam-variációs vizsgálatok kopáseredményei

Konklúzió

Az eddig elvégzett vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a vizsgálat egyes paramétereinek megváltoztatása a szabványban megadott paraméterekhez képest nem szükséges (pl: vizsgálati időtartam), míg más paraméterek megváltoztatása erősen indokolt (pl: terhelés, hőmérséklet). Az elért eredmények alapján megállapítható, hogy a megváltoztatott paraméterekkel (100°C hőmérséklet és 150 N terhelés) valósághűbb és alacsonyabb szórásmezővel rendelkező eredmények biztosíthatók, azonban a módszerfejlesztés kezdetekor kitűzött célokat (túlterhelés és erős adhéziós kopás megszüntetése) még nem sikerült megfelelő hatékonysággal biztosítani.

6.3.2. Kenési rendszer fejlesztése

A következőkben a kenési rendszer került elemzésre, illetve az, hogy a súrlódó felületek közé kerülő kenőolaj esetén milyen fejlesztési potenciál található. A korábbi eredmények alapján azt feltételeztem, hogy a vizsgálat során a mozgási energia súrlódás hatására hőenergiává alakul és ez a hőmennyiség nem képes megfelelően elhagyni a tribológiai rendszert. A használt Optimol SRV®5 típusú tribométerhez vásárolható egy olyan kiegészítő rendszer, amellyel a gépre egy, a tribométer alapprogramja által vezérelhető perisztaltikus pumpa felszerelhető és hozzá 2,8 mm belső átmérőjű szilikoncsőrendszer csatlakoztatható. A rendszerrel, hasonlóan egy valóságos belsőégésű motorhoz, akár nyitott, akár zárt olajkör megvalósítható, továbbá a vizsgálatok során az olajkörben található kenőolaj előfűthető, tehát kondicionálható. Az összeállított rendszert és az olajszállítás irányát a 50. ábra szemlélteti.



50. ábra: Az Optimol SRV®5 tribométerhez megvásárolt folyamatos keringtetésű olajrendszer összeállított képe

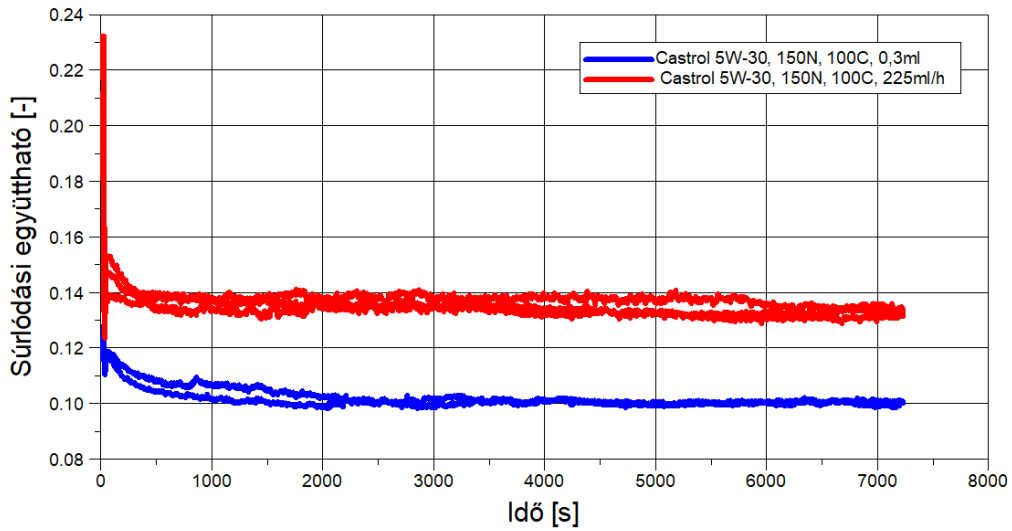
Az általam összeállított olajrendszer egy olyan zárt rendszerből áll, amely folyamatosan szállítja a kenőolajat a felső próbatesttartó oldalához és ezáltal a felső golyó próbatesthez, és folyamatosan szállítja el az olajat az alsó próbatesttartóból. A rendszer számára kritikus fontossággal bír, hogy az elvezető szakasznál az elszívott olajba ne kerüljenek levegőbuborékok, azaz ne szívjon el levegőt. A perisztaltikus pumpa hatékonyan csak összenyomhatatlan folyadék halmazállapotú közeget képes szállítani. A levegőbuborékok megakadályozása érdekében a használt alsó próbatest befogóban minden időpillanatban egy adott mennyiségű folyadéknak kell lennie, ezért egy méréshez legalább 13-15 ml kenőolaj használata szükséges, a használt csőszakasz hosszától függően. A használt csőszakaszok jelentős része szilikon cső, amely cserélhető, így tisztításuk egyszerű. A rendszerhez egyetlen olyan csőszakasz tartozik, amely nem cserélhető, ez pedig a fűtőszálnál található rész, amelyet

két vizsgálat között alaposan ki kell tisztítani az egyes vizsgálatok pontossága érdekében. A perisztaltikus pumpa által realizálható térfogatáram erősen függ a szállított közeg viszkozitásától, ezért a vezérlőprogramban csak a pumpa fordulatszáma állítható be, százalékos értékekkel, 1%-os lépésközzel.

Egy vizsgálathoz négy csőszakaszra van szükség: egy 25 cm-es csőszakaszra, amely ragasztott szilikon ütközőkkel ellátott (ez biztosítja a perisztaltikus pumpa térfogatáramát) és 3 db, egyenként 25 cm-es szilikoncső szakaszra, amely a perisztaltikus pumpa be- és kivezető részeihez csatlakozik. Két szilikoncső csatlakozását egy átlátszó műanyag köztes elemmel lehet megoldani, míg a szilikoncső további csatlakozásaira a tribométeren elhelyezett fém csővégek adnak lehetőséget. A csőszerelvényeket tiszta állapotban kell felhelyezni a csatlakozási helyükre, különben a csatlakozó felületek szennyeződhetnek a vizsgálati kenőolajjal és csúszóssá válnak, amely a csatlakozás vizsgálat közbeni szétcsúszását eredményezheti.

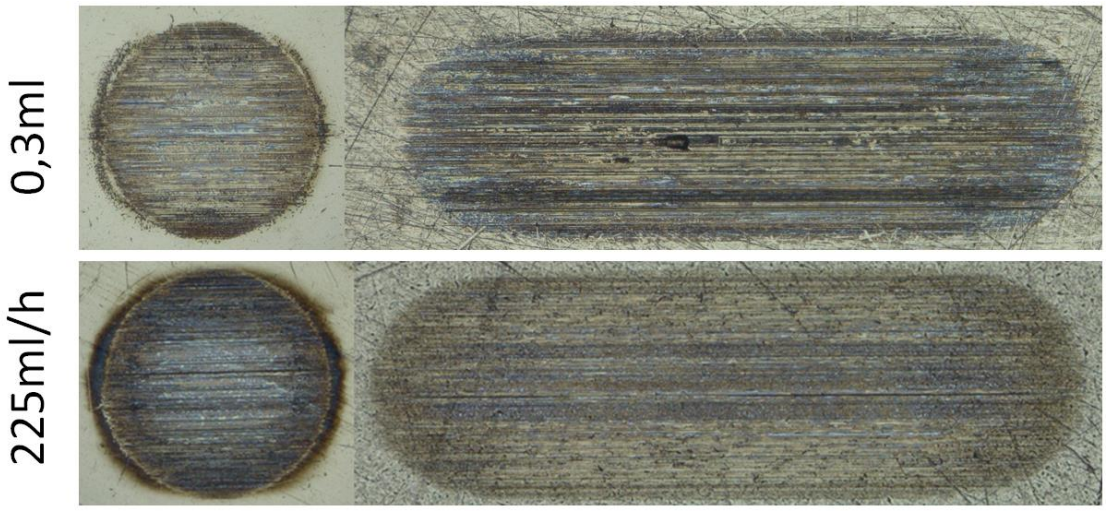
A két mérés között nem cserélhető csővezetékek takarításához egy belső szabályzatot hoztunk létre, amely alapján minden mérés előtt alapos tisztítást kell végezni. Az ehhez szükséges eszközök: 1 db fecskendő gumicső-csatlakozási lehetőséggel, 2 db pipatisztító szál, 1 db műanyag pohár, illetve féktisztító folyadék, mint tisztító folyadék. A pontos tisztítási folyamat leírását az 1. melléklet tartalmazza.

Az eddigi kísérletek alapján optimálisnak talált vizsgálati paraméterekkel (150 N terhelés, 100°C hőmérséklet, 2 óra időtartam) végeztem vizsgálatokat a folyamatos olajkeringtetésű rendszerrel kiegészítve. A vizsgálatok során a perisztaltikus pumpa fordulatszámát 30%-ban állapítottam meg, amely a használt kenőolajminta esetén 225 ml/h térfogatáramnak feleltethető meg. A kiválasztott 225 ml/h-s tárfogatáramot korábbi tapasztalati értékek alapján állapítottam meg. A perisztaltikus kenési rendszerhez tartozik egy előkondicionáló fűtőszál is, amellyel a kenőolaj hőmérséklete a próbatestekétől külön is szabályozható. A vizsgálatok során a kenőolaj hőmérsékletének ugyanazon hőmérsékleti értéket állítottam be, mint a próbatest hőmérséklet. Az előkondicionálás előnye, hogy a kenőolaj hőmérséklete előre beállítható, és nem csak a próbatestek környékén éri el a beállított értéket, ezáltal csökkenthetők a vizsgálatok eredményeit zavaró tényezők. A súrlódásmérési eredményeket az 51. ábra mutatja, összehasonlítva a 0,3 ml kenőolaj egyszeri hozzáadásával elvégzett mérések eredményeivel.



51. ábra: Castrol 5W-30 szériaolajjal 150 N-on és 100°C-os hőmérsékleten elvégzett kenési rendszer variációs súrlódásmérési vizsgálatainak eredményei

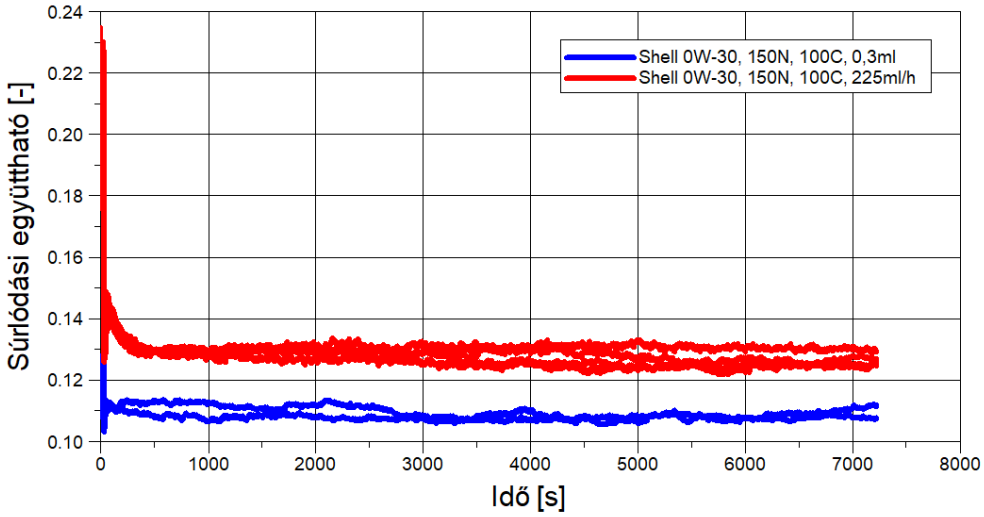
A súrlódásmérési vizsgálatok eredményei alapján megállapítható, hogy a folyamatos keringtetésű olajrendszerrel elvégzett mérések során magasabb súrlódási együttható lép fel a rendszerben, amely azzal magyarázható, hogy nagyobb térfogatmennyiségű kenőolaj található a tárcsa próbatesten, amelynek mozgatása többlet energiát igényel. A súrlódási együttható görbék időbeli lefutását elemezve kijelenthető, hogy a folyamatos keringtetésű rendszer alkalmazásával a görbék rövidebb idő alatt kiegyenesednek, összehasonlítva az egyszeri olajhozzáadással. Mindkét típusú vizsgálat során mért súrlódási együttható görbe teljesíti az előzetesen kitűzött célokat és elvárásokat, hiszen a bejáratás megfelelően rövid idő alatt megtörténik, a bejáratás után a görbe kiegyenesedik és ezt az állapotát a mérés végéig megőrzi. Az egymástól külön elvégzett méréseket elemezve megállapítható, hogy a mérések által meghatározható szórásmező nagysága megfelelően alacsony (kevesebb, mint 0,015).



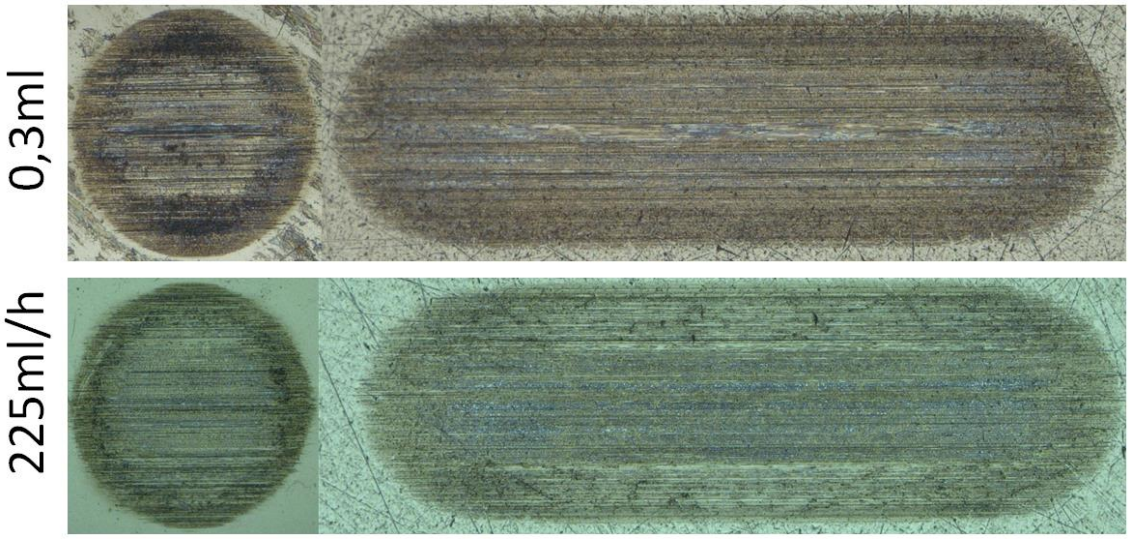
52. ábra: Kopásképek, Castrol 5W-30 szériaolaj 150 N, 100°C, 0,3ml és 225ml/h kenési rendszer, 200x-os nagyítás

A 52. ábra mutatja a folyamatos olajkeringtetésű rendszerrel elvégzett vizsgálatok során keletkező kopásképeket. A kopásképek elemzése során megállapítható, hogy a vizsgálatok során egy egyenletes kopás jelentkezett. Összehasonlítva az ugyanilyen paraméterekkel, de 0,3 ml olaj egyszeri hozzáadásával elvégzett mérésekkel (43. ábra, alsó sor) kijelenthető, hogy a folyamatos keringtetésű rendszer során a próbatesteken keletkezett kopás nem mutatja a tribológiai túlterheltség, illetve a magas arányú összehegedéses kopás jeleit. A golyó próbatesten a kopásképen mellett keletkezett egy sötétebb színű sáv, amely a tárcsa próbatesten található nagyobb mennyiségű kenőolajjal és az az okozta hőterheléssel magyarázható. A vizsgálatok összesített eredményei alapján kijelenthető, hogy a folyamatos keringtetésű olajrendszer a vele szemben támasztott követelményeknek maximálisan megfelel, a megállapított 225 ml/h-s térfogatáramon változtatni nem szükséges.

Annak érdekében, hogy megbizonyosodjak a kifejlesztett vizsgálati módszer hatékonyságáról, egy másik típusú és viszkozitási osztályú kenőolaj (Shell 0W-30) is elemzésre került. Az 53. ábra mutatja az elvégzett tribológiai vizsgálatok súrlódási eredményeit, és egyértelműen látható, hogy a folyamatos keringtetésű rendszer esetén figyelhető meg a tribológiai rendszerek bejáratódására jellemző súrlódási együttható csökkenési tendencia. A bejáratódás után a mért súrlódási együttható értékek csak kismértékben változnak, a görbe lefutása itt egyenesnek tekinthető. Az 54. ábra mutatja a Shell 0W-30 motorolajjal és a kifejlesztett vizsgálati módszerrel elvégzett vizsgálatok során keletkezett kopásképeket, amely egyértelműen bizonyítja, hogy a korábban tapasztalt tribológiai túlterheltség, a felületre ráégett olaj, illetve a megnövekedett adhéziós kopásra utaló nyomok nem lelhetők már fel a felületeken.

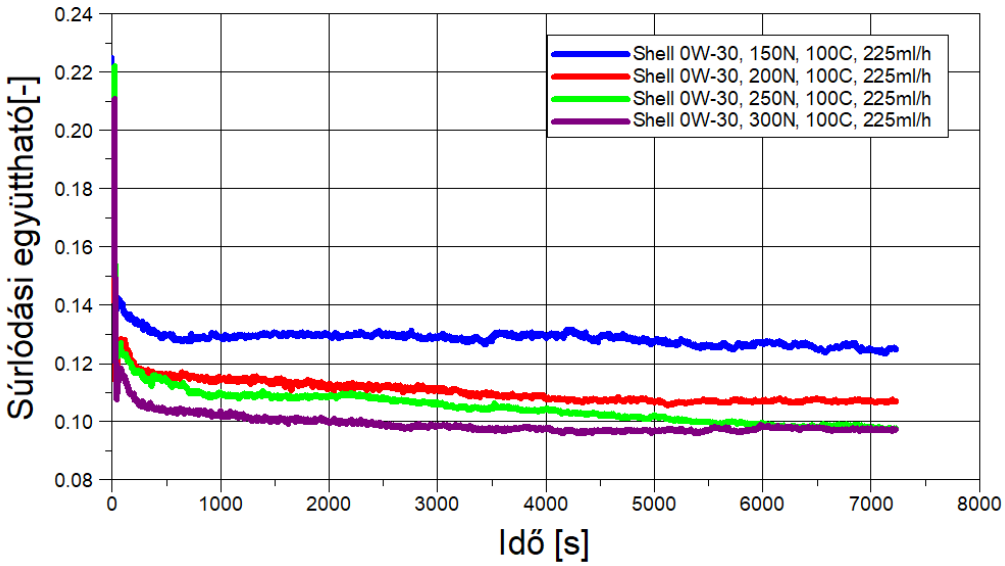


53. ábra: Shell 0W-30 szériaolajjal 150 N-on és 100°C-os hőmérsékleten elvégzett kenési rendszer variációs súrlódásmérési vizsgálatainak eredményei



54. ábra: Kopásképek, Shell 0W-30 szériaolaj 150 N, 100°C, 0,3ml és 225ml/h kenési rendszer, 200x-os nagyítás

A Shell 0W-30-as motorolaj-mintával egy terhelés-variációs méréssorozat is elvégzésre került. Az eredményeket az 55. ábra ismerteti, amely alapján megállapítható, hogy az eredmények megfelelő tendenciát hoztak, a mért súrlódási együttható görbék időbeli lefutása az elvárásoknak megfelel. A mérési eredmények alátámasztják azt a megállapítást, hogy a kenési rendszer megváltoztatásának jelentősen nagyobb hatása van tribológiai vizsgálatok eredményére, mint a terhelés változtatásának. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a korábban megállapított vizsgálati paramétereken változtatni nem szükséges.



55. ábra: Shell 0W-30 szériaolajjal 100°C-on és 225ml/h olajmennyiséggel elvégzett terhelésvariációs súrlódásmérési vizsgálatok eredményei

Az elvégzett tribológiai módszerfejlesztés eredményeként megállapítható, hogy a nemzetközi szabványban szereplő, ISO 19291:2016-os [65] kenőolaj tribológiai összehasonlító vizsgálati módszer motorolajok esetén pontosítható. A pontosítás elsősorban a vizsgálati módszerben ismertetett kenési rendszert érinti, a 0,3 ml kenőolaj egyszeri hozzáadásával működő rendszer felváltható egy perisztaltikus pumpával megvalósítható folyamatos keringtetésű olajrendszerrel, amely a tribológiai vizsgálatok során az érintkező felületek között keletkező hőmennyiséget képes elvezetni a vizsgálati rendszerből, így a vizsgálati próbatestek érintkező felületeinek túlterhelése jelentősen csökkenthető egy közel észrevehetetlen szintig. A bevezetett folyamatos keringtetésű olajrendszer hatékonyabban szimulálja a belsőégésű motorokban tapasztalt viszonyokat és így az elvégzett vizsgálatok eredményei is pontosabbá tehetők [138].

A végleges vizsgálati metódusról készült munkautasítás megtalálható a 2. mellékletben.

7. Nanoméretű szemcsékkel adalékolt kenőolajminták előkészítési folyamata

Doktori értekezésem fő témája a különböző anyagösszetételű nanoméretű szemcsékkel adalékolt kenőolajminták tribológiai tulajdonságainak vizsgálata és elemzése. A megfelelő kenőolaj-minta elkészítése a tribológiai vizsgálatok számára kiemelt fontosságú. Egy nanoméretű szemcsékkel rosszul homogenizált kenőolajminta nem képes pozitív tribológiai hatásokat kifejteni, csak a negatív, gátló tulajdonságai érvényesülnek. A 3.3.1. fejezetben ismertetésre került, hogy az irodalomban fellelhető információk alapján nincs egy egységes keverési módszer, amellyel hatékonyan lehetne különböző nanoméretű szemcséket homogenizálni. A legtöbb tanulmány mágneses keverőt és/vagy ultrahangos homogenizálót használ a kenőolajminták előkészítéséhez, azonban sem az időtartamok, sem az egyéb beállítási paraméterek nem egyeznek. Ezen információk alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a tribométeres vizsgálatok pontossága érdekében egy egyedi, a saját igényeinknek megfelelő és a tanszéken található eszközökkel elvégezhető módszer kifejlesztése szükséges.

A kifejlesztendő homogenizálási módszerrel szemben olyan követelmények kerültek meghatározásra, amelyek biztosítják azt, hogy a tribológiai vizsgálatok során kimért különbségek tényleges különbségek és nem a homogenizálási módszer hiányosságai. Ennek érdekében különös figyelmet kell szentelni annak, hogy az olajminták mindig ugyanolyan körülmények között kerüljenek homogenizálásra, ugyanazon paraméterek alkalmazása mellett.

A használandó nanoméretű kerámiaszemcsék nagyon kis méretűek, amely szállóporként belélegezhető és egészségre káros hatású. Ennek elkerülése érdekében különböző biztonsági óvintézkedések és szabályok betartása szükséges. A szemcsékkel való érintkezés során nitril-kesztyű és porvédő maszk használata kötelező. Mivel a nanoméretű szemcsék ebben a szállópor formában általában több 10, több 100 szemcse agglomerátumából állnak, így ezeket az agglomerátumokat a porvédő maszk képes megszűrni. Ilyen állapotban nagyon ritka, hogy a szemcsék egyszemcse formában legyenek jelen, a szemcsék közötti másodlagos Van der Waals-erők miatt a nagyobb agglomerátumok a jellemzőek.

A kísérleti adalék-olaj minta elkészítéséhez az alábbi eszközök szükségesek: 2 törlőpapír, műanyag pipetta, vegyszerkanál, bázisolaj, adalék, mágneses keverő és a hozzá tartozó teflon-bevonatú mágneses keverőbaba, főzőpohár, illetve a koncentráció számításokhoz papír, toll, számológép, illetve stopperóra.

A szemcsék homogenizálásának első lépése a szükséges tömegek meghatározása. A tudományos tanulmányokban a vizsgálati olajmintákat tömegszázalékos koncentrációban adják meg, illetve a szükséges koncentrációk kimérése is tömeg alapján történik. A szükséges tömegadatok meghatározásakor egy alsó és egy felső határ megadása szükséges: az alsó határ az az olajmennyiség, amely minimum szükséges a tervezett vizsgálatok elvégzéséhez, míg a felső határ az, ami maximálisan elkészíthető a használt laborüveg, illetve a mérleg maximális kapacitása alapján. Továbbiakban szükséges az előírt adalék-olaj koncentráció alapján meghatározni az olaj/adalék részarányát oly módon, amely segítségével a mintákat elkészítettem. Minden olajminta esetén az adott tömegszázalék koncentráció mindig az elkészült össztömegre vonatkozik.

A minta elkészítésének második lépése a kialakított elegy homogén állapotának biztosítása. Az elkészült mintát, a mágnesbabával együtt a kikapcsolt állapotú mágneses keverőre kell helyezni, majd a keverőt 1000 1/perc fordulattal 10 percen keresztül keverni. A mágneses keverés közben célszerű a következőkben használandó ultrahangos homogenizálót bekapcsolni és a fűtést 50°C-ra kapcsolva elindítani. A mágneses keverés után a főzőpoharat az ultrahangos homogenizálóban 30 percen keresztül 50°C-on homogenizálni. Az ultrahangos homogenizáló nagy frekvenciájú (20-400 kHz) hanghullámokkal kavitációt hoz létre az elegyben és ezzel fellazítja az adalék agglomerációkat, így homogenizálva a keveréket. A 30 perces ultrahangos keverés után a keverék visszakerül a mágneses keverőre és a külön mérésekhez szükséges mintákat külön kisebb főzőpohárba szortírozzuk fecskendővel. Minden egyes mintába külön mágneses keverőbaba kerül. A szortírozás során a főminta folyamatos mágneses keverési állapotban van, a pontos homogenitás megőrzése érdekében. Az egyes vizsgálatokhoz tartozó minták szortírozására azért van szükség, mivel így lehet biztosítani, hogy az egyes mérésekhez tartozó minták mindig ugyanazon koncentrációban ugyanazon homogenizálási folyamaton esnek át, így minden minta az adott hőmérsékleteken mindig ugyanazt az időtartamot tölti el.

Az egyes mérésekhez szükséges minták esetében a homogenizálási folyamat (10 perc mágneses keverés, 30 perc ultrahangos keverés) a tribométeres vizsgálatok előtt még egyszer megtörténik. Az ultrahangos keverés után a minta visszakerül a mágneses keverőre és egészen addig folyamatosan kevert állapotban marad, amíg a minta betöltésre nem kerül a tribométer olajkörébe.

A pontos bekeverési és homogenizálási folyamatról készült munkautasítás megtalálható a 3. mellékletben.

8. Kenőolajban homogenizált nanoméretű kerámia szemcsék tribológiai tulajdonságainak vizsgálata

Jelen fejezet tartalmazza a disszertáció tárgyát képező nanoméretű kerámiaszemcsék kenőolaj adalékként való alkalmazhatósági vizsgálatainak eredményeit. Az értekezésben vizsgált adalékokat (ZrO_2, CuO és Y_2O_3) a szükséges nanoméretben (<50 nm) a Reanal Laborvegyszer Kereskedelmi Kft.-n keresztül szereztem be.

A három vizsgált nanokerámia tulajdonságai:

- ZrO_2: a 1314-23-4-es CAS-számú, 99%-nál tisztább, 15-25 nm átlagos szemcseméret. A nanorészecskék moláris tömege 123,2 g/mol, és sűrűsége 5,77 – 5,85 g/cm^3, 20°C-on mérve [140].
- CuO: 1317-38-0-s CAS-szám, szemcsék átlagos szemcseméret kisebb, mint 50 nm. A nanorészecskék moláris tömege 79,55 /mol, és sűrűsége pedig 6,315 g/cm^3, 20°C-on mérve [141].
- Y_2O_3: 1314-36-9-es CAS-szám, szemcsék átlagos szemcseméret kisebb, mint 50 nm. A szemcsék moláris tömege 225,8 g/mol, míg sűrűségük 5,01 g/cm^3, 20°C-on mérve [142].

Az adalékok tribológiai tulajdonságainak vizsgálatához két különböző kenőolaj típus merült fel: adalékolatlan bázisolaj, vagy szériaérett, adalékolt motorolaj. A két típusú olajminta közötti legnagyobb különbség az, hogy a szériaérett motorolaj 30-40%-ban különböző adalékokat tartalmaz, amelyek javítják az olajminta valamely tulajdonságait. Egy kísérleti adaléktípus tribológiai tulajdonságainak feltérképezése érdekében a már adalékolt olajminta használata nem célszerű, hiszen előfordulhatnak olyan fizikai és kémiai folyamatok az egyes adaléktípusok között, amelyek a különböző adalékok pozitív tulajdonságait kioltják. Az adalékok pontos és zavartalan tribológiai tulajdonságainak feltérképezése érdekében a választás az adalékolatlan bázisolajra esett, mivel az ezen olajtípusok adalékolatlansága ez esetben előnyös. Két típusú bázisolaj használata jöhetett szóba: a Group III típusú, hidrokrakkolt szintetikus olaj vagy Group IV típusú PAO (poli-alfa-olefin) teljesen szintetikus bázisolaj. Különböző intézetektől és cégektől azt az információt sikerült beszerezni, hogy a PAO bázisolaj költségessége miatt a járműipar a Group III típusú bázisolajra tervezi felépíteni a motorjaikban használt olajokat, így ezek alapján a vizsgálatokhoz szintén Group III típusú bázisolaj került alkalmazásra. Az egyes bázisolaj-csoportosítások alapvető információi megtalálhatók a 3.1.2. fejezetben. A vizsgálatokhoz szükséges bázisolajat a MOL-LUB Kft. biztosította oly módon, hogy az olajgyártó sorban található tartályból vette le a szükséges

bázisolaj mennyiséget. A Group III típusú bázisolaj finomított ásványolaj párlatok keveréke, amely különböző hosszúságú szénhidrogén-molekulákból (C20-C50) épül fel, lobbanáspontja 200 és 235°C közti, 15°C-on mért sűrűsége (MSZ EN ISO 12185 alapján mérve) 0,820 – 0,840 g/cm^3, 40°C-on mért kinematikai viszkozitása (MSZ EN ISO 3104 alapján mérve) 19 – 25 mm^2/s [143].

A nanoméretű adalékok kenőolajba történő homogenizálása kiemelt fontosságú az ilyen tribológiai vizsgálatok során. A homogenizálási módszer fejlesztési folyamatát a 7. fejezet, míg a végleges folyamatról készült munkautasítást a 3. melléklet tartalmazza.

Több irodalmi forrás is használt kiegészítő felületaktív adalékot annak érdekében, hogy biztosítsák az elkészített minták homogén állapotának hosszútávú megmaradását. Ezen irodalmi forrásokra alapozva az úgynevezett Triton X-100-as (másnéven: polietilén-glikol-terc-oktilfenil-éter, $(C_2H_4O)_nC_{14}H_{22}O$, CAS: 9002-93-1 [144]), nem-ionos tulajdonsággal rendelkező felületaktív adalékot használtam, amely képes diszperz módon eloszlatni a kerámia szemcséket a kenőolaj mintában. Azért erre az adalékra esett a választás, mivel több tulajdonsága is utal arra, hogy alkalmas kerámia nanorészecskék homogén eloszlásának biztosítására. Legfontosabb tulajdonsága, hogy nem-ionos felépítésű. Egy zsíroldható (olajban oldható) farokrészből és egy hidrofil fejrészből felépülő molekula. A Triton X-100 esetében a fejrész se elektron többlettel (-) se elektron hiánnyal (+) nem rendelkezik, ezáltal nem ionos detergensnek számít. A nem-ionos típusra azért esett a választás, hogy ne lépjen reakcióba a motorolaj ionos adalékaival. Az etoxilezett nem-ionos felületaktív anyagoknak (amilyen a TX100) nincs szükségük társ-felületaktív anyagok jelenlétére, így csak egyetlen adalékot kell a keverékbe tenni [145]. A Triton X-100 felületaktív adalék különböző jótékony homogenizáló tulajdonságait különböző tanulmányok is bizonyítják: fullerén szemcsék jelenlétében [146], TiO_2 nanorészecske stabilizálására [147], illetve Mn-Co-Ni-O kerámia stabilizálására [148]. Liang és társai [149] tribológiai vizsgálatokat végeztek el víz alapú rendszerben, amelyben grafén lapkákat TX100 adalékkal stabilizáltak.

A Triton X-100, mint felületaktív adalék mellett további érvek is szóltak:

- A TX100 nem veszélyes anyag, így nem igényel speciális védőfelszerelést
- A Triton nem öregíti a motorolajat
- Anyagösszetétele alapján vizsgálatok után könnyen eltávolítható a felületről, így nem befolyásolja a SEM-EDX elemanalízis vizsgálatok eredményeit
- Könnyen és olcsón beszerezhető

Minden adalék típus esetén megvizsgáltam, hogy a diszpergens adalék olajban való jelenléte milyen irányba módosítja a tribológiai eredményeket. Annak érdekében, hogy a TX100-as adalék ne befolyásolja a mérési eredményeket, minden tritonnal elkészült mintába 1 tömegszázaléknyi diszpergens adalék került. Az 1%-os érték meghatározásában elsődleges szerepet játszott az, hogy egy későbbi, magasabb nanorészecske koncentrációs olajminta esetén is legyen elegendő homogenizáló adalék az olajban a szükséges diszpergáló hatás biztosítása érdekében. Fontos megemlíteni, hogy a tritonnal készült kísérleti olajmintákat mindig a tritonnal adalékolt bázisolajjal elvégzett referenciamérések eredményeivel hasonlítottam össze.

Az Optimol SRV®5 tribométerrel elvégzett vizsgálatokhoz az ISO 19291:2016-os szabványban ismertetett szabványos próbatesteket alkalmaztam, amelyek 100Cr6 anyagminőségből készült golyó és tárcsa próbatestek. A próbatestek pontos paramétereit (keménység, felületi érdesség stb.) a 3. és 4. táblázat, míg a 100Cr6 (1.3505) anyagminőség szabványos anyagösszetételét a 6. táblázat ismerteti.

6. táblázat: 100Cr6 jelzésű golyó és tárcsa próbatestek anyagminőségének szabványos anyagösszetétele [150]

Elem	Kémiai összetétel
C	0,98 – 1,1 %
Si	0,15 – 0,3 %
Mn	0,25 – 0,45 %
P	≤ 0,025 %
S	≤ 0,025 %
Cr	1,3 – 1,6 %

A homogenizálás után a tribométeres vizsgálatok következtek, amelyekhez a 6.3. fejezetben ismertetett vizsgálati programot alkalmaztam. Az első vizsgálatok referenciavizsgálatok voltak, a pontosabb összehasonlítás érdekében. Az első vizsgálatok nem voltak sikeresek, a méréseket nem sikerült a tervezett időtartamig járatni, a használt próbatestek érintkező felületei nagyon hamar tönkrementek, amelyek a mért súrlódási együtthatót is túlzottan megnövelték és a vizsgálatok során beállított biztonsági határérték elérése után a berendezés saját magát leállította, megvédve a mérőberendezést. A hiba elemzése során megállapítottam, hogy az adalékolatlan bázisolaj nem képes a vizsgálati módszertan során megállapított 150 N-os terhelést elviselni, amelynek oka az olajban nem

fellelhető tribológiai adalékok (nagy nyomásnak ellenálló, úgynevezett extreme pressure felületaktív adalék). A 6.3. fejezetben ismertetett vizsgálati programban megállapított terhelési értékek szériaérett motorolajok felhasználására kerültek megállapításra, nem pedig bázisolaj-minták vizsgálatára. Ennek kiküszöbölése érdekében a használt terhelési érték csökkentésre került annak érdekében, hogy a vizsgálatok során érintkező felületek bázisolaj jelenléte mellett se károsodjanak ilyen mértékben. A vizsgálatok alapján 100 N az a terhelés érték, amelyet jelen vizsgálati próbatestek használata mellett a rendszer korai károsodás nélkül képes elviselni. Ezek alapján a további vizsgálatok a korábban meghatározott, folyamatos keringtetésű vizsgálati módszer alkalmazása mellett kerültek elvégzésre, azzal a kiegészítéssel, hogy a használt terhelés 150 N-ról 100 N-ra csökkent. Ezen terhelés csökkentés elsődleges oka, hogy az adalékolatlan bázisolajban nem találhatók meg azok az extrém nyomásnak ellenálló adalékok, amelyek segítenék a 150 N-os terhelés elviselését. A nanoméretű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatához használt végleges vizsgálati paramétereket a 7. táblázat tartalmazza.

7. táblázat: Nanomretű kerámia szemcsékkel erősített olajminták tribológiai vizsgálatához használt tribométeres vizsgálati paraméterek

Lépés	Frekvencia	Löket	Próbatest hőmérséklet	Terhelés	Olaj hőmérséklet	Olaj térfogatáram	Idő
1	50 Hz	1 mm	100°C	50 N	100°C	225 ml/h	30 s
2	50 Hz	1 mm	100°C	100 N	100°C	225 ml/h	2 h

A tribométeres vizsgálatok elvégzése után a próbatestek felületén keletkező kopást egy, az ISO 19291:2016-os szabványban is specifikált optikai digitális mikroszkóp (Keyence VHX-1000) segítségével vizsgáltam meg, készítettem róla 100x és 200x-os felvételeket, illetve a mikroszkóp segítségével megmértem a golyó próbatest felületén keletkezett kopás átmérőjét az oszcilláló mozgás irányával párhuzamosan és merőlegesen is.

A kiválasztott mérések során keletkezett kopásképek további elemzésre kerültek: egy Leica DCM 3D típusú konfokális mikroszkóppal a tárcsán keletkezett kopott felület kerül digitalizálásra és ebből a 3.3.3. fejezetben ismertetett folyamat mentén a keletkezett kopás térfogata került meghatározásra. A vizsgálat lényege az, hogy az elkészült felvételen a kopáskép egyértelműen körbehatárolható, és a nem kopott felületek adatai alapján a felület átlagos magasságbeli értéke meghatározható. Ezután a körbehatárolt részen belül az előbb meghatározott magasság alatt lévő térfogati érték az elkopott anyag térfogata. Továbbiakban a

kiválasztott tárcsák kopott felületeit Hirox SEM 4000M pásztázó elektronmikroszkóppal is elemeztem a felületen fellelhető, kopási mechanizmusokra utaló nyomokat keresve, illetve a felület kémiai elemzése érdekében.

A keletkezett kopásképeket további elemzés céljából megvizsgáltam egy Thermo Scientific Helios G4 PFIB CXe elektronmikroszkóppal, illetve egy Spect fotoelektron-spektrométer (XPS) segítségével is.

Az elvégzett vizsgálatokat összefoglalva a 8. táblázat ismerteti.

8. táblázat: Összefoglaló táblázat az elvégzett vizsgálatokról

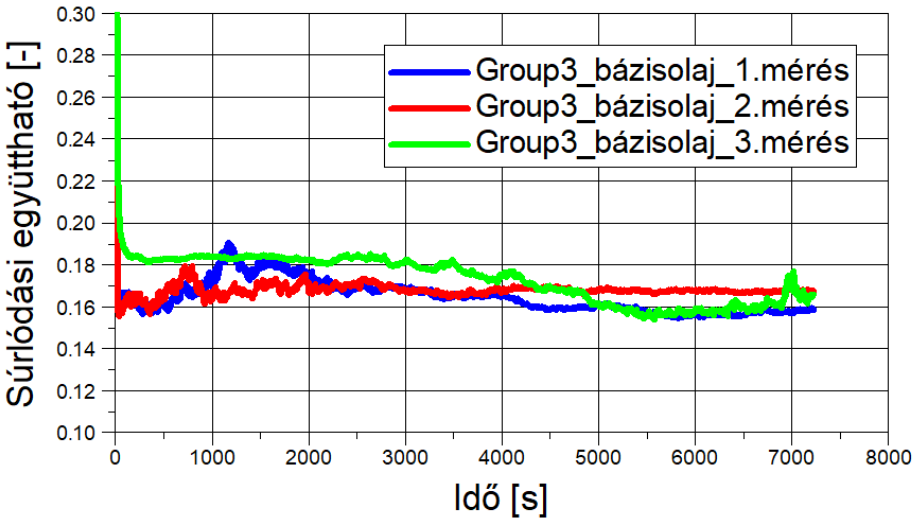
Elvégzett vizsgálatok	ZrO_2	CuO	Y_2O_3
Nanorészecske koncentrációk	0 – 0,6 wt%, 0,1% lépésközzel	0 – 0,6 wt%, 0,1% lépésközzel	0 – 0,6 wt%, 0,1% lépésközzel
TX100 koncentráció	0 és 1 wt%	0 és 1 wt%	0 és 1 wt%
Tribométer	X	X	X
Digitális mikroszkóp	X	X	X
Konfokális mikroszkóp	X	X	X
Pásztázó elektronmikroszkóp	X	X	X
PFIB SEM	X	X	X
Spect XPS	-	X	-

8.1. Referenciavizsgálatok

A tribológiai modellvizsgálatok és alapkutatások elsődleges célja a kísérleti variációs lehetőségek (jelen disszertációban nanoméretű szemcsék kenőolaj adalékként) összehasonlítása referenciavizsgálatok eredményeivel. Ennek érdekében nagyszámú, egymástól független mérést végeztem el a referenciaként használt bázisolajjal, a MOL-LUB Kft. által biztosított 4 cSt kinematikai viszkozitású Group III típusú bázisolajjal.

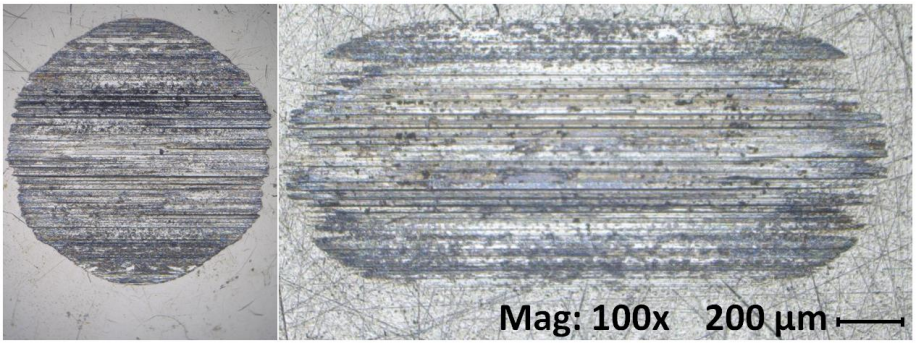
A Group III típusú bázisolajjal elvégzett súrlódásmérési vizsgálatok eredményeit az 56. ábra ismerteti. A referenciamérések fontossága érdekében a tiszta bázisolajos mérésekből több ismétlő mérést is elvégeztem (8 mérés) 100 N-os terhelés alkalmazásával, amelyek segítségével megállapíthattam a referenciaként használt bázisolaj okozta súrlódási és kopási veszteségeket. A mérések kiértékelése érdekében a súrlódási együttható görbék utolsó negyedéből kerültek értékek meghatározásra, ahol a súrlódási görbe kiegyenesedik és a görbe hullámzása, ingadozása megszűnik. Az elvégzett 8 darab, egymástól független mérések

eredményeit statisztikailag kiértékelve megállapítható, hogy a Group III típusú, 4 cSt kinematikai viszkozitású bázisolaj minta súrlódási együttható értéke 0,1589 ± 0,0145, amely 9,1%-os relatív szórás [151].



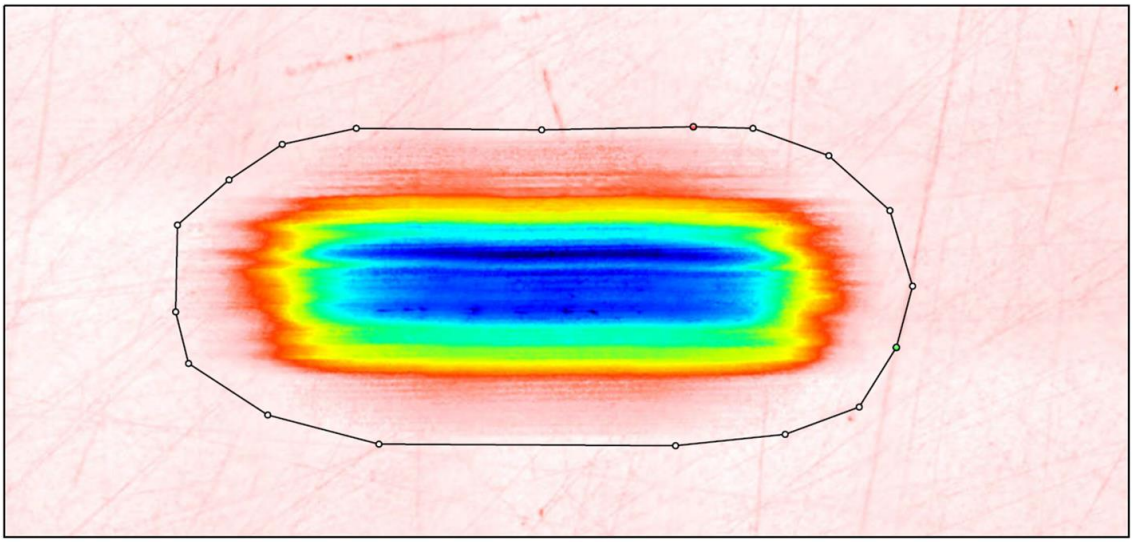
56. ábra: A referenciának használt Group III típusú, 4 cSt kinematikai viszkozitású bázisolaj tribológiai vizsgálatainak eredményei 100 N-os terhelésen

A vizsgálatok során használt próbatestek érintkező felületeinél keletkező kopás szintén elemzésre került: egyrészt a golyó próbatesten keletkező körszimmetrikus kopás kopásátmérője került meghatározásra (d_1 és d_2, kopásátmérő az alternáló mozgással párhuzamos és arra merőleges irányban mérve), másrészt a kopott felületek elemzése történt meg, a fellépő kopási mechanizmusra utaló jelek után kutatva. A referenciának használt Group III bázisolaj elemzése során megállapításra került, hogy a mérések során a golyó próbatest felületén keletkezett körszimmetrikus kopás átlagos mérete 699,83 µm ± 80,88 µm, amely 11,55%-os relatív szórás. A kopásképek elemzése során az a megállapítás tehető, hogy a kopott felületek egy erősen terhelt képet mutatnak, viszonylag magas kopásátmérő jelenléte mellett. A kopásképet megfigyelve megállapítható, hogy a jellemző mechanizmus az abráziós, illetve a fáradásos kopás, mivel a felületen erős abráziós barázdák, illetve kráteres mélyedések láthatók (lásd: 57. ábra) [152].



57. ábra: A referenciának használt Group III típusú, 4 cSt kinematikai viszkozitású bázisolajjal elvégzett vizsgálatok során a próbatesteken keletkezett kopások 100x-os nagyítással készített digitális mikroszkópos felvételei

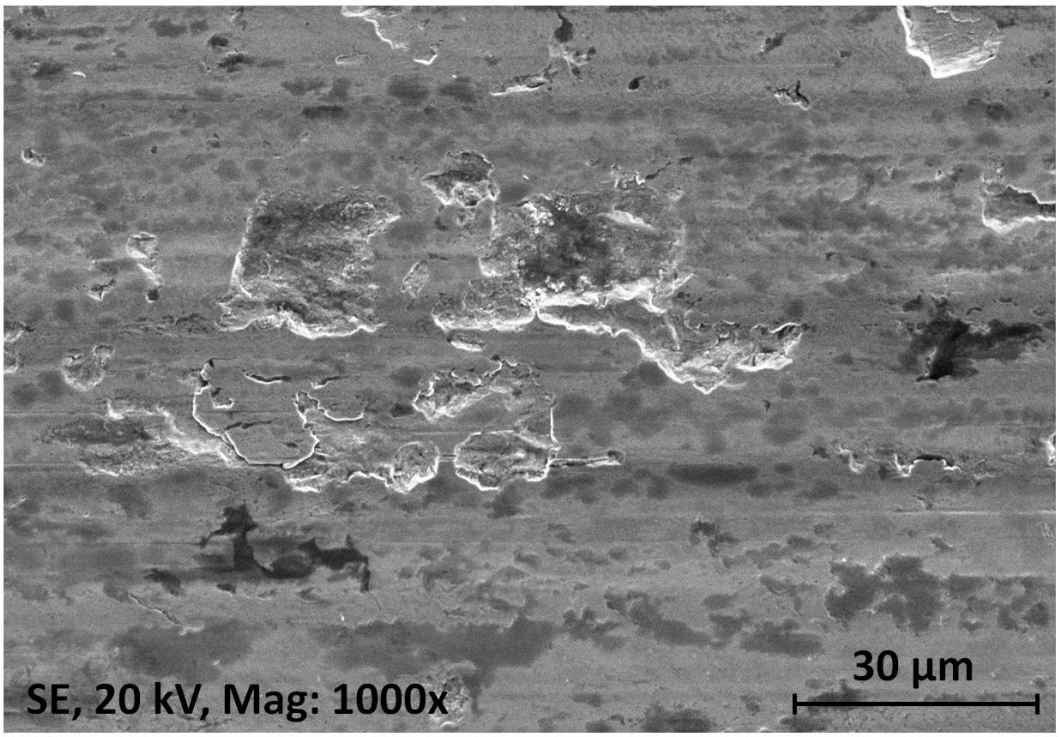
A tárcsa próbatesteken keletkezett kopás pontosabb meghatározása érdekében konfokális mikroszkópos felvételek készültek, amellyel a keletkezett kopáskép digitalizálásra került. Az elkészült felvételek kiértékelése során megállapítható a hiányzó anyag térfogata, a kopástérfogat. A kiértékelés után megállapításra került a referencia Group III 4 cSt olajminta kopástérfogata, 2.365.002 µm^3 értékben, ahogyan azt az 58. ábra is mutatja [152].



	Árkok	Csúcsok
Felület (mm^2)	0.872	0.0674
Térfogat (µm^3)	2365002	5457
Max. mélység/magasság (µm)	8.12	0.338
Átlagos mélység/magasság (µm)	2.71	0.0809

58. ábra: A referenciának használt Group III típusú, 4 cSt kinematikai viszkozitású bázisolajjal végzett vizsgálatok során a tárcsa próbatesten keletkezett kopás elemzése konfokális mikroszkóppal, 100x-os nagyítással, a mért kopástérfogati eredménnyel

A tárcsa felületén végbemenő kopási folyamatok megértése érdekében a kopott felületek pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) is elemzésre kerültek. A mikroszkóp segítségével nagy nagyítású, 1000x-es felvételek készültek a felület különböző helyeiről, mind a holtpontok környékéről, mind pedig a löket közepéről. A referencia Group III bázisolaj okozta kopásnyomról készült elektronmikroszkópos felvételt az 59. ábra ismerteti. Az ábrán láthatók azok a fáradásos kopásnyomok, kráterek, amelyek a digitális mikroszkópos felvételeken kisebb nagyításban is megfigyelhetők. Az energia-diszperzív röntgen spektroszkópiával (EDX) kiegészített elektronmikroszkópos elemzéssel megállapításra került a kopott felületek anyagösszetétele, amelynek eredményeit a 9. táblázat ismerteti. Az eredmények nagyságrendileg megegyeznek a 100Cr6 anyagminőségű tárcsa összetételével, azonban a mérések megnövekedett szén és oxigén jelenlétét mutatták ki. A megnövekedett széntartalom egyértelműen a tribológiai vizsgálat során az érintkező felület felső részeibe beépült szénhidrogén jele, amelyek a használt Group III-as bázisolajat építik fel. A megnövekedett oxigén pedig a felület levegővel való érintkezése során keletkező vékony átoxidált réteg jelenlétét jelzi [152].



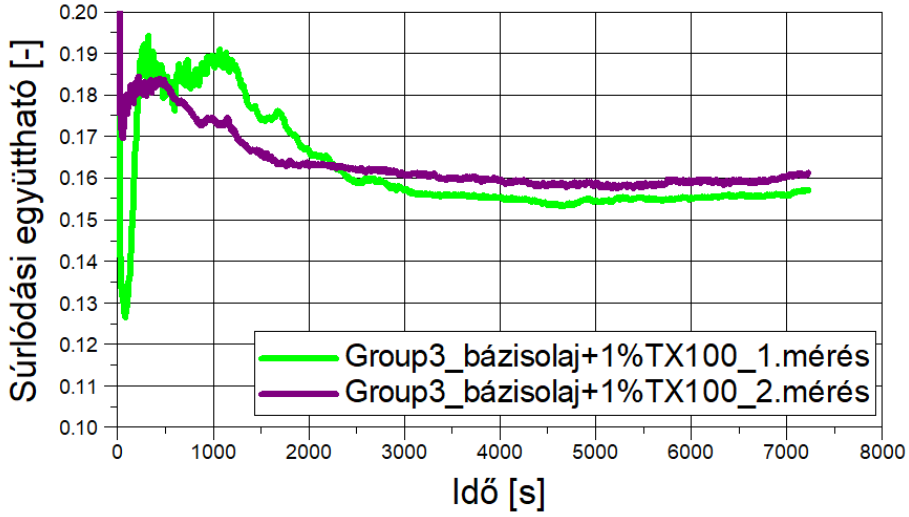
59. ábra: A referenciának használt Group III típusú, 4 cSt kinematikai viszkozitású bázisolajjal elvégzett vizsgálatok során a tárcsa próbatesteken keletkezett kopásról készített 1000x-es nagyítású pásztázó elektronmikroszkópos felvétel

9. táblázat: A referenciának használt Group III típusú, 4 cSt kinematikai viszkozitású bázisolajjal elvégzett vizsgálatok során a tárcsa próbatesten keletkezett kopásról készült EDX elemanalízis eredménye

Elem	Fe	Cr	Si	O	C
Tömegszázalék	82,21%	1,16%	1,88%	8,14%	6,61%

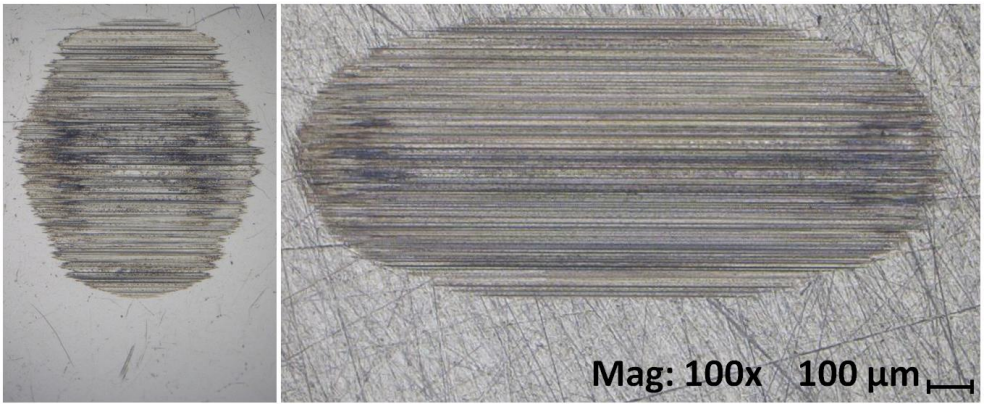
Minden általam vizsgált adalék esetén megvizsgáltam azt is, hogy az egyes adalékok számára szükséges-e Triton X100-as diszpergens adalék alkalmazása is a pozitív tribológiai hatás biztosítása érdekében. Annak érdekében, hogy a TX100-al adalékolt kerámia-olaj minta kiértékelése megfelelő legyen, az ilyen mintákat egy ugyanakkora triton-mennyiséggel adalékolt bázisolajhoz hasonlítottam. A Group III típusú, 4 cSt kinematikai viszkozitású bázisolajba 1 tömegszázalék triton diszpergenst homogenizáltam a korábban ismertetett folyamat alapján. Az 1 tömegszázalékos érték kiválasztásánál figyelembe vettem azt is, hogy a legnagyobb mennyiségű nanokerámia koncentráció esetén is elegendő diszpergens adalék álljon rendelkezésre az olajmintában a homogén részecske-eloszlás biztosítása érdekében. A tritonnal adalékolt bázisolaj esetén a tiszta bázisolajjal elvégzett méréseket megismételtem.

A 60. ábra a tritonos referenciaolaj súrlódásvizsgálatainak eredményeit szemlélteti. A súrlódási együttható időbeli lefutása hasonlít a triton nélküli mérések eredményeihez, a bejáratódási szakasz jelentősen több időt igényel a tritonos bázisolaj esetén. A tritonos bázisolajjal szintén nagyszámú, egymástól független vizsgálatot végeztem el, amelyek alapján az olajminta által okozott átlagos súrlódási együttható értéke 0,1528-re adódott, amelynek szórása ± 0,0046, tehát 3%-os relatív szórás.

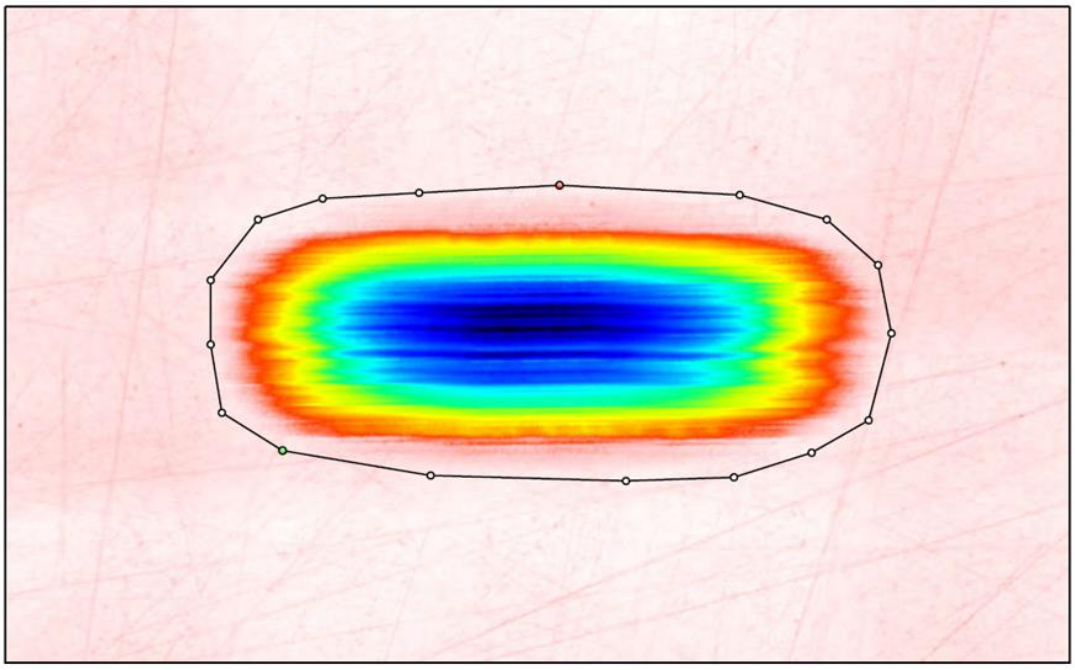


60. ábra: A referenciának használt 1 tömegszázalék TX100 diszpergenssel adalékolt Group III típusú, 4 cSt kinematikai viszkozitású bázisolaj tribológiai vizsgálatainak eredményei

A kopott felületek digitális mikroszkópos elemzése különös eredményeket mutatott. A golyón keletkezett kopásnyom formája jelentősen eltér a triton nélküli mérések során tapasztalttól, erősen oválissá vált. A kopásképen szintén erősen megváltozott: a triton nélküli méréseknél megállapított erős fáradásos kopásnyomok eltűntek, helyettük az abráziós kopás erősödött fel, mély kopásbarázdákat hagyva hátra. A golyón keletkezett kopásképek mozgási iránnyal párhuzamos, és arra merőleges irányban történt kopásátmérő eredményeinek kiértékelése során az átlagos kopásátmérő 591,86 µm-re adódott, amelynek szórása ± 50,17 µm, tehát 8,5%-os relatív szórás. A számok alapján megállapításra került, hogy mind az átlagos kopásátmérő, mind pedig az egymástól független mérések között megfigyelt szórásmező csökkent, amely egyértelműen az olajmintához hozzáadott triton diszpergens adalékkal magyarázható.



61. ábra: A referenciának használt 1 tömegszázalék triton (TX100) diszpergenssel adalékolt Group III típusú, 4 cSt kinematikai viszkozitású bázisolajjal elvégzett vizsgálatok során a próbatesteken keletkezett kopások 100x-os nagyítással készített digitális mikroszkópos felvételei

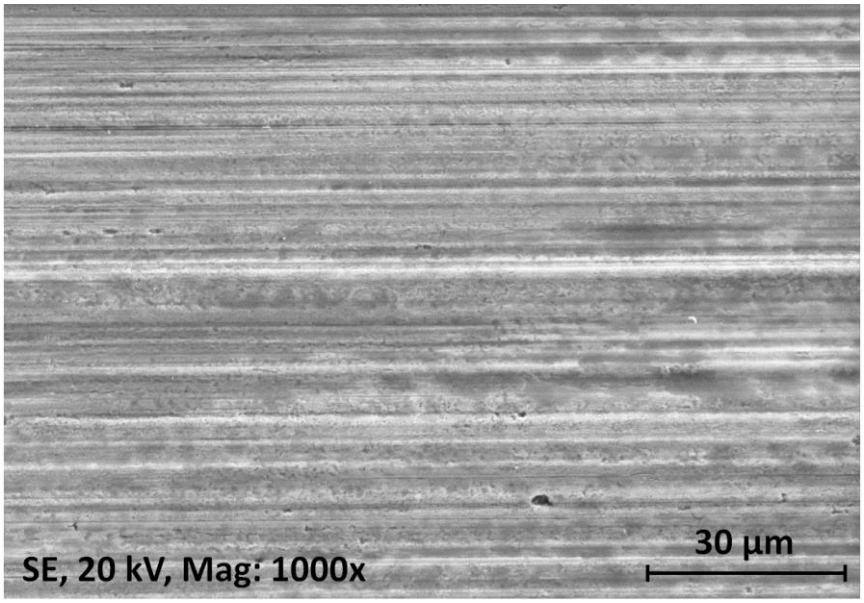


	Árkok	Csúcsok
Felület (mm^2)	0.846	0.0485
Térfogat (μm^3)	2769576	3202
Max. mélység/magasság (µm)	7.99	0.206
Átlagos mélység/magasság (µm)	3.27	0.066

62. ábra: A referenciának használt Group III + 1% TX100 típusú olajmintával végzett vizsgálatok során a tárcsa próbatesten keletkezett kopás elemzése konfokális mikroszkóppal, 100x-os nagyítással, a mért kopástérfogati eredménnyel

Az 1 tömegszázalék (wt%) X100-as triton felületaktív adalékkal kiegészített Group III-as bázisolajminta mikroszkópos elemzése során, hasonlóan a tiszta Group III-as olajmintához, elkészítettem az olajmintával elvégzett tribológiai vizsgálatok során keletkezett kopásképek konfokális mikroszkópos elemzését. Az így nyert eredményeket a 62. ábra ismerteti. Az eredmények alapján megállapítható, hogy összehasonlítva a tiszta Group III-as mintával a tritonnal adalékolt bázisolaj okozta kopástérfogat szignifikánsan magasabb. Ez az érték 2.769.576 μm^3-re adódott. Ezen megemelkedett érték magyarázható azzal, hogy a triton egy olyan adalék, amely elsősorban diszpergens adalék, így az elsődleges feladata az olajmintába került szilárd halmazállapotú szemcsék szétválasztása és lebegtetésben tartása, és nem az olajminta tribológiai tulajdonságainak javítása. Azonban egyes nanoméretű szemcsék vizsgálata során elengedhetetlen a diszpergens adalék használata annak ellenére, hogy kismértékben rontja a minta kopásgátló tulajdonságait.

A referenciaminták digitális mikroszkópos felvételeinek összehasonlítása során megállapított jelentős különbség az elektronmikroszkópos képeken is megfigyelhető. 63. ábra által ismertetett tritonos referenciaolaj elektronmikroszkópos felvétele egyértelműen kevesebb összehegedéses és fáradásos kopást mutat, összehasonlítva a triton nélküli, tiszta Group III-as bázisolaj eredményeivel (59. ábra). Kismértékű fáradásos kopás itt is megfigyelhető, azonban annak aránya és erőssége jelentősen alacsonyabb.



63. ábra: A referenciának használt 1 tömegszázalék triton (TX100) diszpergenssel adalékolt Group III típusú, 4 cSt kinematikai viszkozitású bázisolajjal elvégzett vizsgálatok során a tárcsa próbatesteken keletkezett kopásról készített 1000x-es nagyítású pásztázó elektronmikroszkópos felvétel

Hasonlóan a tiszta Group III-as bázisolajhoz, a tritonnal adalékolt bázisolaj esetén is elvégeztük az olaj által okozott kopásképe EDX elemanalízisét, amelynek eredményét a 10. táblázat ismerteti. Összehasonlítva a triton nélküli minta eredményeivel (9. táblázat) kijelenthető, hogy jelentősen kisebb arányban jelent meg a szilícium, az oxigén, illetve a szén elem. Ez azt jelenti, hogy a felületen jelentősen kevesebb szénhidrogén molekula található (bázisolaj származék), illetve a felület oxigénnel való érintkezése és korróziója is kevésbé számottevő.

10. táblázat: A referenciának használt 1 tömegszázaléknyi triton (TX100) diszpergenssel adalékolt Group III típusú, 4 cSt kinematikai viszkozitású bázisolajjal elvégzett vizsgálatok során a tárcsa próbatesten keletkezett kopásról készült EDX elemanalízis

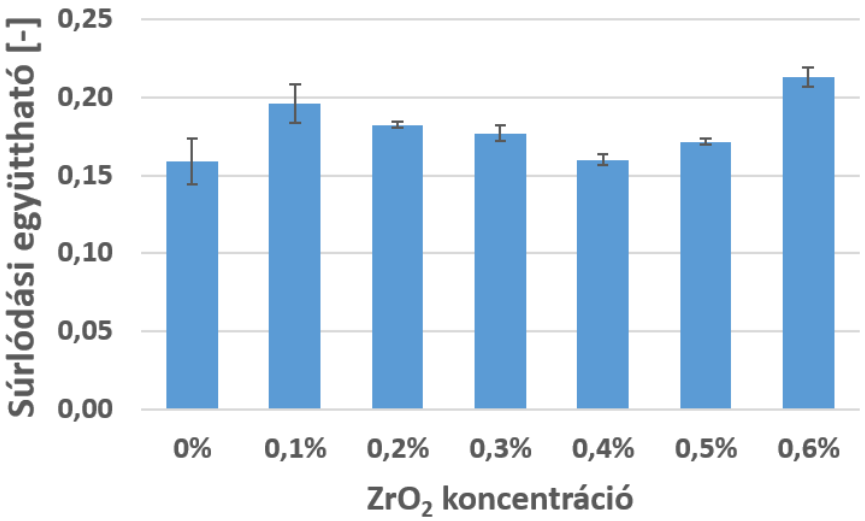
Elem	Fe	Cr	Si	O	C
Tömegszázalék	95,92%	1,34%	0,11%	1,52%	1,11%

A Group III 4 cSt bázisolajjal elvégzett referenciavizsgálatok során az olaj és annak tribológiai tulajdonságai feltérképezésre kerültek. Mivel a tribológiai modellvizsgálatok elsődleges célja az összehasonlítás, így az összehasonlítás alapjául szolgáló mérések kiemelt fontosságúak. A referencia bázisolajjal nagyobb számú, egymástól független vizsgálatot végeztem el annak érdekében, hogy a nagyobb számú, 8 mintából pontosabb referencia adatokat lehessen meghatározni.

A referenciavizsgálatok után a kiválasztott nanoméretű kerámiaszemcsék kerültek elemzésre. A vizsgálatokat ugyanazzal a vizsgálati módszerrel végeztem el, mint a referenciaként használt bázisolaj esetében. A nanoméretű kerámiaszemcsék esetén is megvizsgáltam, hogy szükséges-e hozzáadott TX100-as diszpergens a megfelelő homogenizáció érdekében. Majd 6 különböző koncentrációban készült olajmintákkal végeztem el a golyó-tárcsa tribométeres vizsgálatokat és a hozzájuk tartozó mikroszkópos kiértékelést. A kiértékelésekhez elsősorban a súrlódási együttható és a kopásátmérő került felhasználásra oly módon, hogy a súrlódási együtthatót a vizsgálatok utolsó 10 percéből állapítottam meg (ahol a rendszer stabilizálódik és nincs jelentős súrlódási együttható változás), míg a kopásátmérőt az ISO szabvány szerint mozgásiránnyal párhuzamosan és arra merőlegesen mértem.

8.2. Cirkónium(IV)-oxid nanokerámia szemcsékkel elvégzett vizsgálatok eredményei

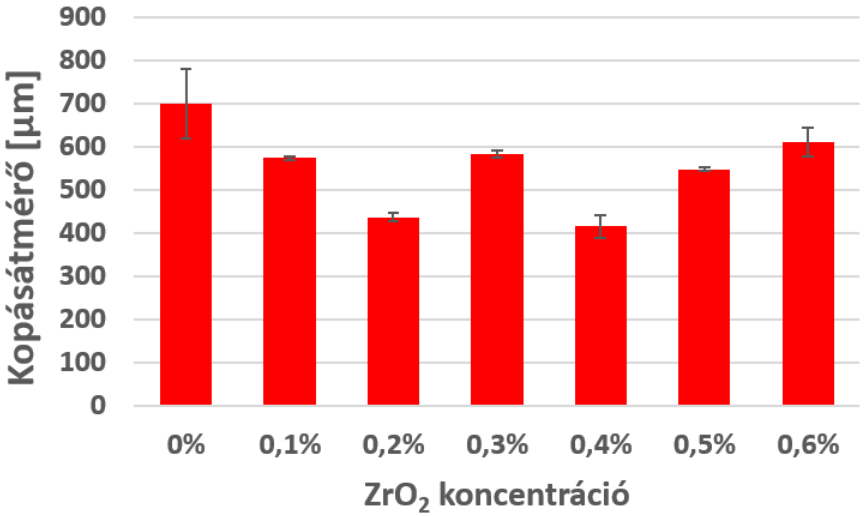
A nanoméretű cirkónia szemcsékkel 6 különböző összetételben készültek vizsgálandó kenőolaj minták, amelyeknek alapja az adalékolatlan Group III típusú bázisolaj, 4 cSt kinematikai viszkozitással. Minden koncentrációval legalább három független golyó-tárcsa tribológiai mérés került elvégzésre, amelyek átlaga és szórása került meghatározásra. A tribológiai vizsgálatok során mért súrlódási együtthatók kiértékelt eredményeit a 64. ábra ismerteti. Az eredmények alapján egy optimális koncentráció megállapítható, ahol a súrlódási együttható minimális, amelynek értéke 0,4 tömegszázalékra adódott. A mért eredmények alapján megállapítható, hogy az átlagos súrlódási együtthatót az optimum ZrO_2 koncentráció nem volt képes csökkenteni, azonban az egymástól független mérések eredményei között fellelhető szórásmező jelentősen csökkent, amely a vizsgálatok stabilitásának pozitív irányba történő elmozdulását jelzik [152-155].



64. ábra: Cirkónium(IV)-oxid nanoméretű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményei, különböző nanorészecske-koncentrációk súrlódási együtthatóinak összehasonlítása

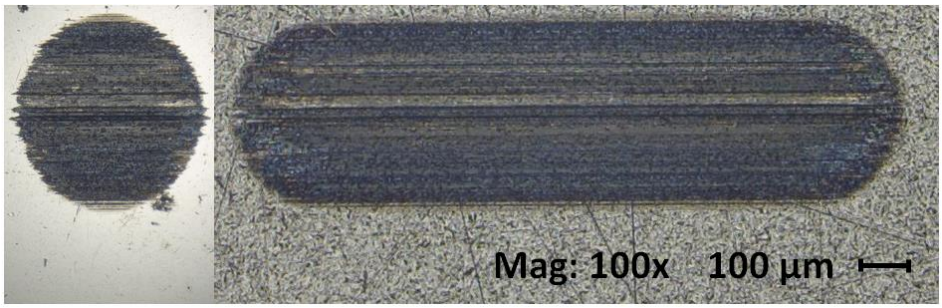
A vizsgálatok során a golyó próbatesteken keletkezett kopás átmérőjének eredményeit a 65. ábra szemlélteti. Az eredmények alapján egyértelműen kijelenthető, hogy a nanoméretű cirkónia adalékolása jelentős kopáscsökkentő tulajdonsággal rendelkezik. A mért kopásátmérők alapján mind a 0,2, mind pedig a 0,4 tömegszázalékos koncentráció optimálisnak tekinthető, amely 40%-os kopásátmérő csökkenést eredményezett, illetve a megállapított szórásmező is jelentősen csökkent. A kopáseredményeket és a súrlódási

együttható eredményeket összevetve a közös optimum 0,4 tömegszázalékban állapítható meg, amely kevesebb mint 1% súrlódásnövekedés mellett 40%-os kopáscsökkentést eredményezett [152-155].



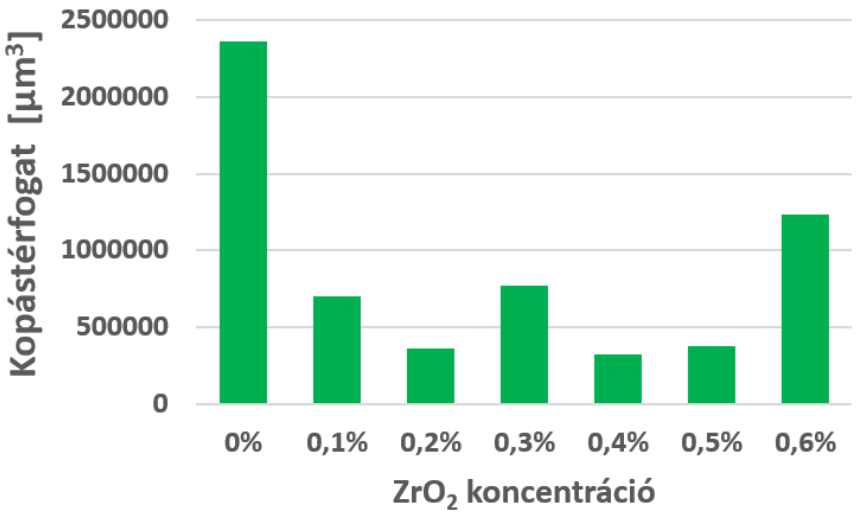
65. ábra: Cirkónium(IV)-oxid nanoméretű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményei, különböző nanorészecske-koncentrációk okozta kopásátmérők összehasonlítása

A digitális mikroszkópos felvételek (66. ábra) rávilágítottak a cirkónia nanokerámia részecskék egyéb, kopással kapcsolatos tulajdonságára is. A cirkónia szemcsék jelentősen csökkentették az érintkező felületeken fellépő összehegedéses és fáradásos kopást, és helyét jelentősen enyhébb abráziós nyomok vették át. Továbbiakban, a felületen látható kismértékű kékes elszíneződés jelzi a felületen megégett olaj nyomait. Valószínűsíthető, hogy a referencia mérés során is történtek hasonlók, azonban a túlzott mértékű terhelés, illetve kopás miatt ezen nyomok a vizsgálat során lekoptak [152-155].



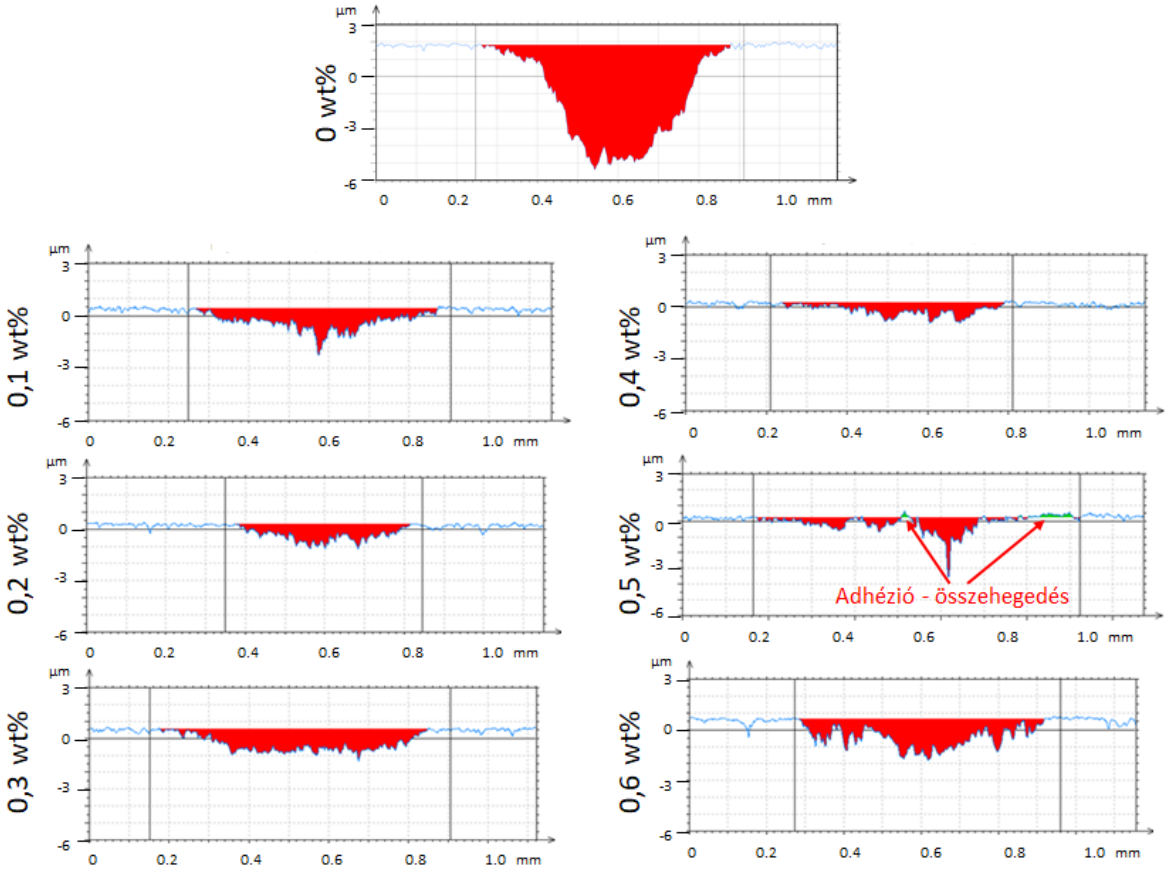
66. ábra: 0,4 tömegszázalékos cirkónium(IV)-oxid szemcsével adalékolt olajminta okozta kopásképek a golyó és tárcsa próbatesteken, digitális mikroszkópos felvétel, 100x-os nagyítással

A Belsőégésű Motorok és Járműhajtások Tanszék Felületanalitika Laboratóriumában található Leica konfokális mikroszkóp segítségével a tárcsa próbatesteken keletkezett kopásképek kerültek digitalizálásra és a referencia felülethez képest hiányzó térfogat, a kopástérfogat került meghatározásra. Az eredmények grafikai ábrázolását a 67. ábra szemlélteti. A kopástérfogat mérések eredménye nagyságrendileg korrelál a kopásátmérő mérések eredményével, az optimális 0,4 tömegszázalékos koncentráció a térfogatmérések segítségével további megerősítést nyert. Az optimális koncentráció 84%-os kopástérfogat-csökkenést eredményezett, amely kiemelkedően jó eredmény. A vizsgálatokból egyértelműen látható, hogy a nanoméretű cirkónia szemcsék kiváló kopásgátló tulajdonságokkal rendelkeznek [152].



67. ábra: Cirkónium(IV)-oxid nanoméretű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményei, különböző nanorészecske-koncentrációk okozta kopástérfogatok összehasonlítása

A konfokális mikroszkópos eredmények segítségével a kopásnyomok keresztmetszeti képeit is megvizsgáltam, ezek alapján megállapítható akár az átlagos kopásmélység, akár a kopás mélységi eloszlása is. A keresztmetszeti kopásképek a 68. ábra alapján kerültek kiértékelésre. Minden cirkónia adalékolt kenőolajminta jelentősen csökkentette a kopásmélységet, azonban ezek közül is a 0,4 tömegszázalékos érték biztosította a legjobb eredményt. Azonban az is megállapítható, hogy az optimálisnál magasabb cirkónia koncentráció károsan hat a kopásképre, hiszen a 0,5 tömegszázalékos mérés eredményeiben megjelentek mind a mélyebb abráziós kopásnyomok, mind pedig az összehegedések, ahogyan azt a 68. ábra utolsó keresztmetszeti kopásképe is mutatja [152].

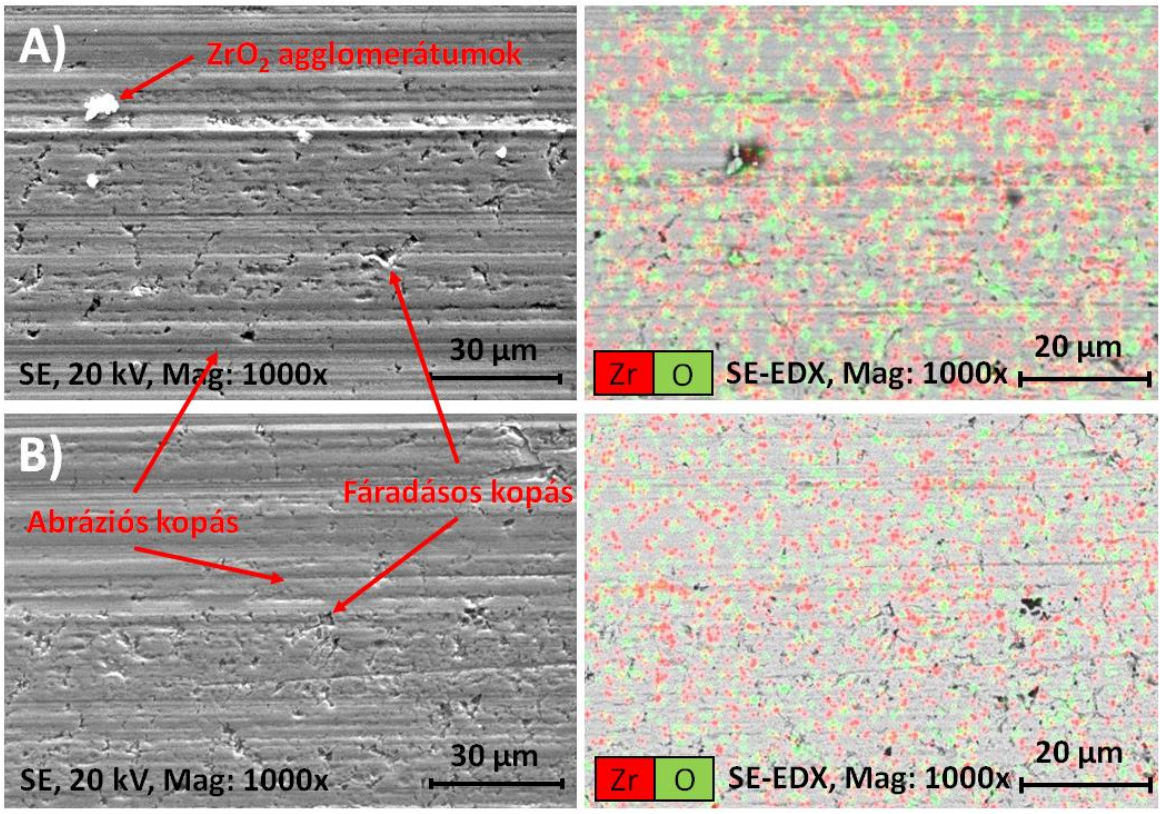


68. ábra: Cirkónium(IV)-oxid nanoméretű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményei, tárcsa kopásnyom keresztmetszeti felvételeinek összehasonlítása

A nanoméretű cirkónium(IV)-oxid kerámia szemcsék tribológiai hatásainak vizsgálata és feltérképezése után a következő kérdést szükséges megválaszolni: pontosan miért és hogyan képes a cirkónia nanoméretben ilyen tulajdonságokat biztosítani egymáson érintkező felületpár esetén. A kérdések megválaszolása érdekében elektronmikroszkópos analízist végeztem, amellyel a kopási mechanizmusokra utaló nyomok meghatározhatók, illetve az EDX szenzor segítségével megállapítható az, hogy található-e cirkónia a felületen, és ha igen, milyen területi eloszlásban. Az elektronmikroszkópos analízis elsődlegesen a Belsőégésű Motorok és Járműhajtások Tanszékének Felületanalitika laboratóriumában került elvégzésre, azonban további, nagyobb nagyítású elemzés is történt a Miskolci Egyetem Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetének 3D laboratóriumában található Thermo Scientific Helios G4 PFIB CXe pásztázó elektronmikroszkóp segítségével.

A 69. ábra ismerteti a Hirox típusú elektronmikroszkóppal készített felvételeket, 1000x-es nagyításban. A felvételen arra a kérdésre segítenek válaszolni, hogy az optimális 0,4 tömegszázalékos koncentráció során az érintkező felületeken milyen kopásnyomok

találhatók, illetve a használt cirkónium milyen arányban található meg. A felületről két specifikus helyen készültek felvételek: a löket közepének helyén, ahol a legnagyobb a relatív sebesség a két érintkező felület esetén, illetve a löketvégi holtpontokban, ahol a legalacsonyabb. A felvételek alapján egyértelműen megállapítható, hogy a kopás fő mechanizmusa az abrázió, kiegészülve kismértékű fáradásos kopással. A felület EDX-szenzorral való elemzése alapján kijelenthető, hogy a felületen jelentős mennyiségű cirkónium található, mind a löketközepi, mind a löketvégi helyeken. A cirkónium jelenlét esetében megjegyzendő, hogy a próbatestek többszöri alapos ultrahangos tisztításon estek át a pontos mérési eredmények érdekében. A cirkónia szemcsék felületen történő jelenlétére magyarázattal szolgál a szemcsék gömb formája, amely elősegíti a részecskék és a fém felület között létrejövő másodlagos Van der Waals-kötéseket, különösképpen a felületi érdességi árkokban vagy kopási barázdákban [152].



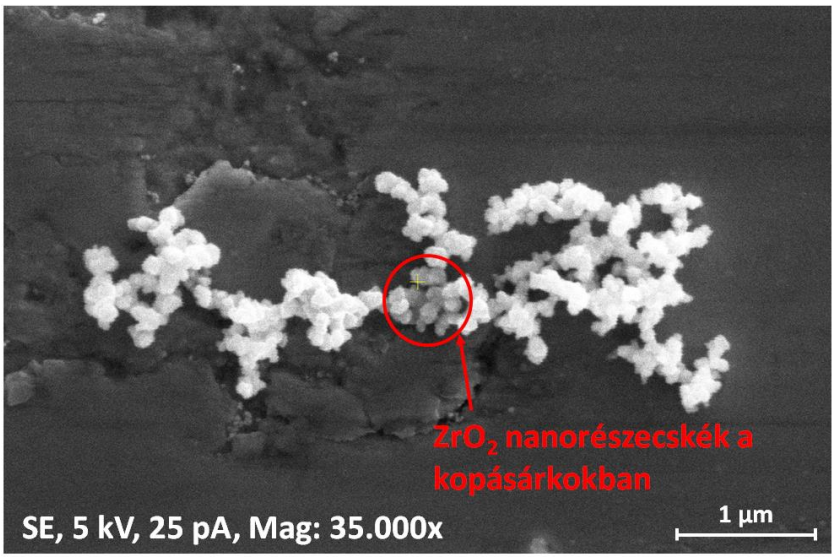
69. ábra: 0,4 tömegszázalékos nanométerű cirkóniával adalékolt kenőolajminta tárcsa próbatesten okozta kopáskép elektronmikroszkópos elemzésének eredménye 1000x-es nagyítással, A) löket közép, B) holtpont

A cirkónia szemcsék felületen történő jelenlétét megerősíti a felületen található elemek kvantitatív elemzése is. Az eredményeket a 11. táblázat ismerteti. A cirkónium elem aránya jelentősen megnőtt a felületen, összehasonlítva a cirkónia-nélküli referenciavizsgálatok eredményeivel. A cirkóniumon kívül még az oxigén megnövekedett jelenléte figyelemre méltó, amely növekedés mind a cirkónia szemcsék oxigéntartalmával, mind pedig a kopott felület esetleges gyenge korróziójával magyarázható [152].

11. táblázat: Cirkónium(IV)-oxid kerámiával adalékolt olajmintával végzett vizsgálatok során a tárcsa próbatesten keletkezett kopás felületének elem eloszlása

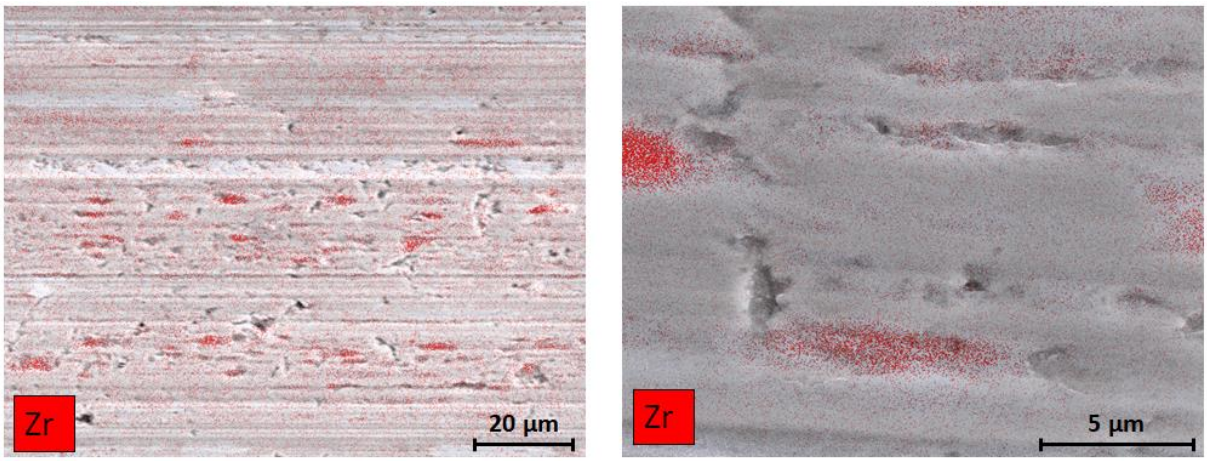
Elem	Fe	Cr	Si	O	C	Zr
0% ZrO_2	82,21%	1,16%	1,88%	8,14%	6,61%	0%
0,4% ZrO_2	62,73%	1,87%	3,82%	21,94%	5,36%	4,28%

A Thermo Scientific pásztázó elektronmikroszkóppal elvégzett nagy nagyítású felvételeket elemezve megfigyelhetők különböző méretű cirkónia-agglomerációk a felületen, azonban ezek megfigyeléséhez nagyon nagy nagyítás volt szükséges. Ahogyan azt a 70. ábra ismerteti, az elektronmikroszkóppal készített 35.000x-es felvételeken megfigyelhetők az említett cirkónia agglomerátumok, és a képeken az egyes szemcsék körvonalai is megfigyelhetők. Az agglomerációk azért képesek alapos tisztítás után is a felületen megtapadni, mivel a részecskék közötti, illetve a szemcsék és a fémfelület közötti másodlagos Van der Waals-kötések elég erősek [152].



70. ábra: Cirkónia agglomeráció a 0,4 tömegszázalékos ZrO_2 olajmintával vizsgált tárcsa próbatest kopásfelületén

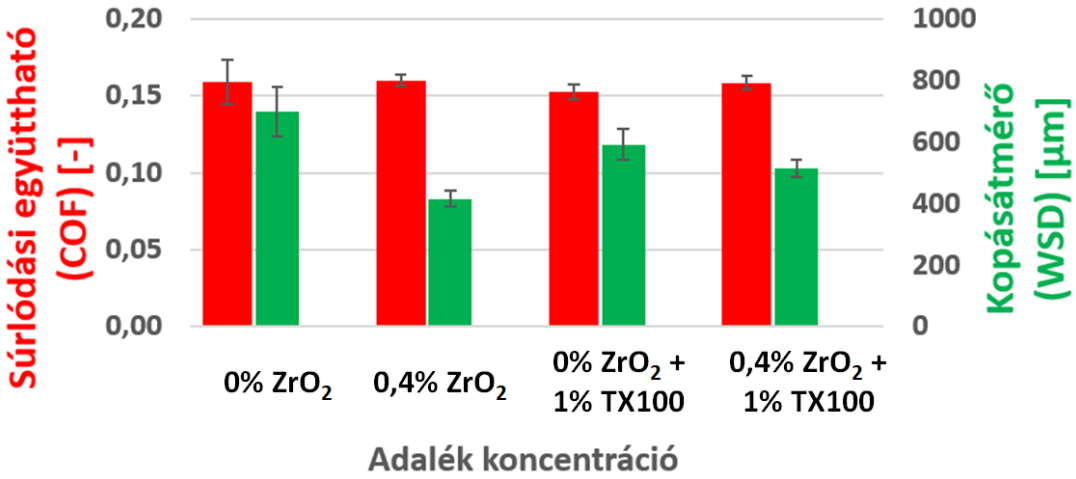
A 71. ábra további nagy nagyítású elektronmikroszkópos felvételeket ismertet, piros színnel megjelölve a cirkónium jelenléti helyeket. A felvételek alapján megállapítható, hogy a cirkónia nanoszemcsék jelentős arányban megtalálhatók a kopott felület kopásárkaiban. Erre enged következtetni a 70. ábra is, ott is megfigyelhetők a felületi árkok kontúrjai, és ezekben az árkokban a cirkónia nanorészecske agglomerációk képesek megtapadni. Az, hogy jelentős mennyiségű cirkónium jelenlétét sikerült kimutatni az árkokban, bizonyítja azt, hogy a cirkónium(IV)-oxid szemcsék az úgynevezett feltöltő mechanizmus (lásd: 28. ábra) alapján képesek pozitív tribológiai hatásokat kifejteni. A nanorészecskék feltöltik a felületi egyenetlenségeket mind az alaptest, mind az ellentest felületén, ezáltal az érintkezés nagyobb felület mentén történik, és a nagyobb érintkező felület csökkenti a felületek között fellépő felületi nyomást. A lecsökkent felületi nyomás csökkenti az érintkező felületek tribológiai terhelését, csökkentve a keletkező kopást, amely növeli az alkatrészek élettartamát [152].



71. ábra: Cirkónium területi eloszlása a 0,4 tömegszázalékos ZrO_2 olajmintával vizsgált tárcsa próbatest kopásfelületén

Annak érdekében, hogy megállapítsam, hogy a leginkább megfelelő tribológiai tulajdonságok biztosítása érdekében szükség van-e az elkészített olajmintában hozzáadott homogenizáló felületaktív jelenlétére, elkészítettem a korábbi eredmények alapján meghatározott optimális ZrO_2-koncentrációs (0,4 wt%) olajmintát további 1 tömegszázalék X100-as Triton diszpergens hozzáadásával is. A tritonnal és ZrO_2-vel is adalékolt mintát a tritonnal adalékolt Group III-as bázisolajjal elvégzett referencia mérésekkel hasonlítottam össze. Ezen olajmintával ugyanazon tribométeres vizsgálatokat végeztem el, amelynek eredményeit a 72. ábra ismerteti.

Az eredmények egyértelműek: extra felületaktív diszpergens adalék hozzáadása nélkül kismértékű súrlódáscsökkenés mellett nagymértékű kopáscsökkenés (40%) tapasztalható, míg a diszpergenssel adalékolt minták összehasonlításakor a súrlódási együttható kismértékben növekedett mérsékelt kopáscsökkenés (13%) mellett. Az eredmények alapján a további mérések során TX100 nélküli minták kerültek elemzésre.

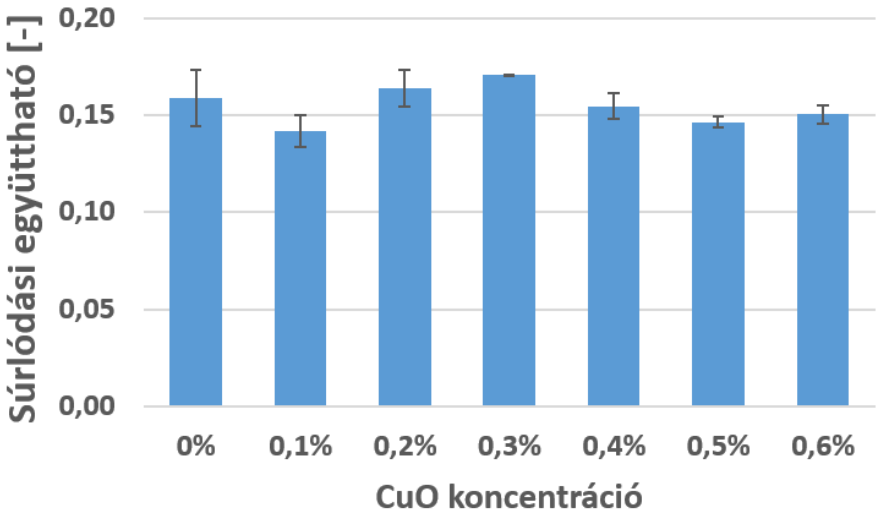


72. ábra: Cirkónium(IV)-oxid nanoméretű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményeinek összehasonlítása, triton diszpergens szükségességének vizsgálata

A cirkónium(IV)-oxiddal elvégzett vizsgálatok alapján kijelenthető, hogy a nanoszemcsék pozitív kopásra gyakorolt hatását a szemcsék azon tulajdonsága váltotta ki, hogy a szemcsék feltöltik a felületi egyenetlenségeket. A megfigyelt másodlagos Van der Waals-kötésekre utaló jelek alapján megállapítható, hogy a nanorészecskék egy gyér kenési állapot, vagy egy újraindítási időszak során is képesek megtapadni a felületi egyenetlenségekben, így azon időszakokban, ahol a leginkább szükséges, meg tudják védeni az érintkező felületeket, meghosszabbítva az alkatrészek élettartamát. A szemcsék ezen tulajdonsága kifizetődő lehet abban az esetben, ha a jövőben a kenőolajok viszkozitása csökken és ezáltal még vékonyabb olajfilm képződik a két felület között [152].

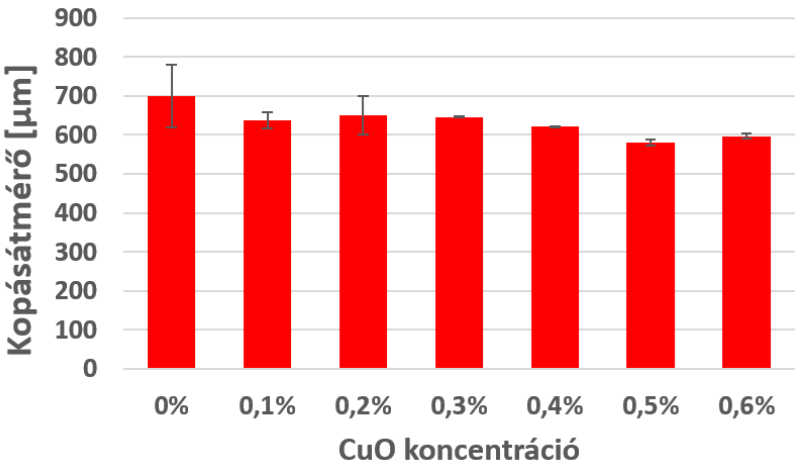
8.3. Réz(II)-oxid nanokerámia szemcsékkel elvégzett vizsgálatok eredményei

A CuO nanorészecskék felhasználásával szintén 6 különböző koncentrációban készültek vizsgálandó olajminták és mindegyikkel 3, egymástól független tribológiai vizsgálat került lefuttatásra. A vizsgálatok során mért súrlódási együtthatók összehasonlítását a 73. ábra ismerteti. A diagram adatai alapján megállapítható, hogy a CuO nanorészecskék kismértékben képesek csökkenteni a vizsgálati rendszer súrlódási veszteségeit [154]. A súrlódási együttható eredmények alapján két optimum koncentráció definiálható: a 0,1 tömegszázalékos és 0,5 tömegszázalékos minta [156-157]. A végső optimum koncentráció meghatározásához további adatokra és információkra is szükség van.



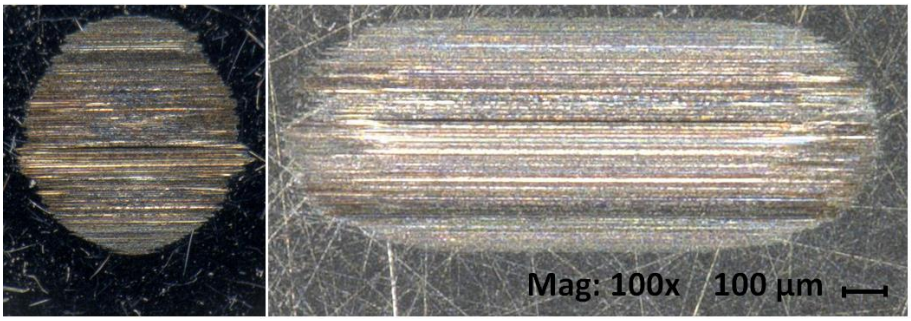
73. ábra: Réz(II)-oxid nanoméretű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményei, különböző koncentrációk súrlódási együtthatóinak összehasonlítása

A vizsgálatok során keletkezett kopásképek ezen vizsgálatok során is alapos mikroszkópos elemzésen estek át, amelynek első lépése a golyón keletkezett kopáskép átmérőjének mérése digitális mikroszkóp segítségével. Az eredményeket a 74. ábra ismerteti. A diagram alapján egyértelműen megállapítható egy optimális koncentráció, amely 0,5 tömegszázalékra adódott. Összevetve a súrlódási együttható értékekkel, a 0,5% mind súrlódásban, mind kopásban pozitív tulajdonságokat biztosít az érintkező próbatestek számára [156-157].



74. ábra: Réz(II)-oxid nanoméretű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményei, különböző nanorészecske-koncentrációk okozta kopásátmérők összehasonlítása

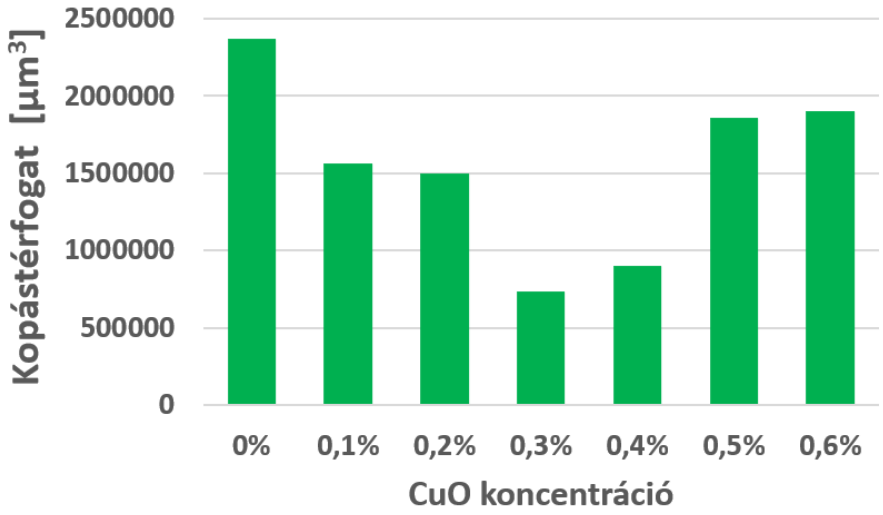
A 0,5 tömegszázalékos vizsgálatok kopásképeit (75. ábra) elemezve érdekes tulajdonság fedezhető fel: a próbatestek legkülső felületét sárga színű réteg borítja. A kopáskép alapján feltételezhető, hogy a vizsgálat során rakódott le a rézszínű réteg a felületre, azonban kérdéses, hogy hogyan, hiszen a használt réz(II)-oxid kerámia fekete színnel rendelkezik. Ezen sárgás felület további elemzést igényel, amely során a pontosabb anyagösszetétele is meghatározható lehet. A felületet tovább elemezve megállapítható, hogy a legjellemzőbb kopási mechanizmus az abráziós kopás, hiszen a képen jelentős kopási árkok láthatók [156-157].



75. ábra: 0,5 tömegszázalékos réz(II)-oxid szemcsével adalékolt olajminta okozta kopásképek a golyó és tárcsa próbatesteken, digitális mikroszkópos felvétel, 100x-os nagyítással

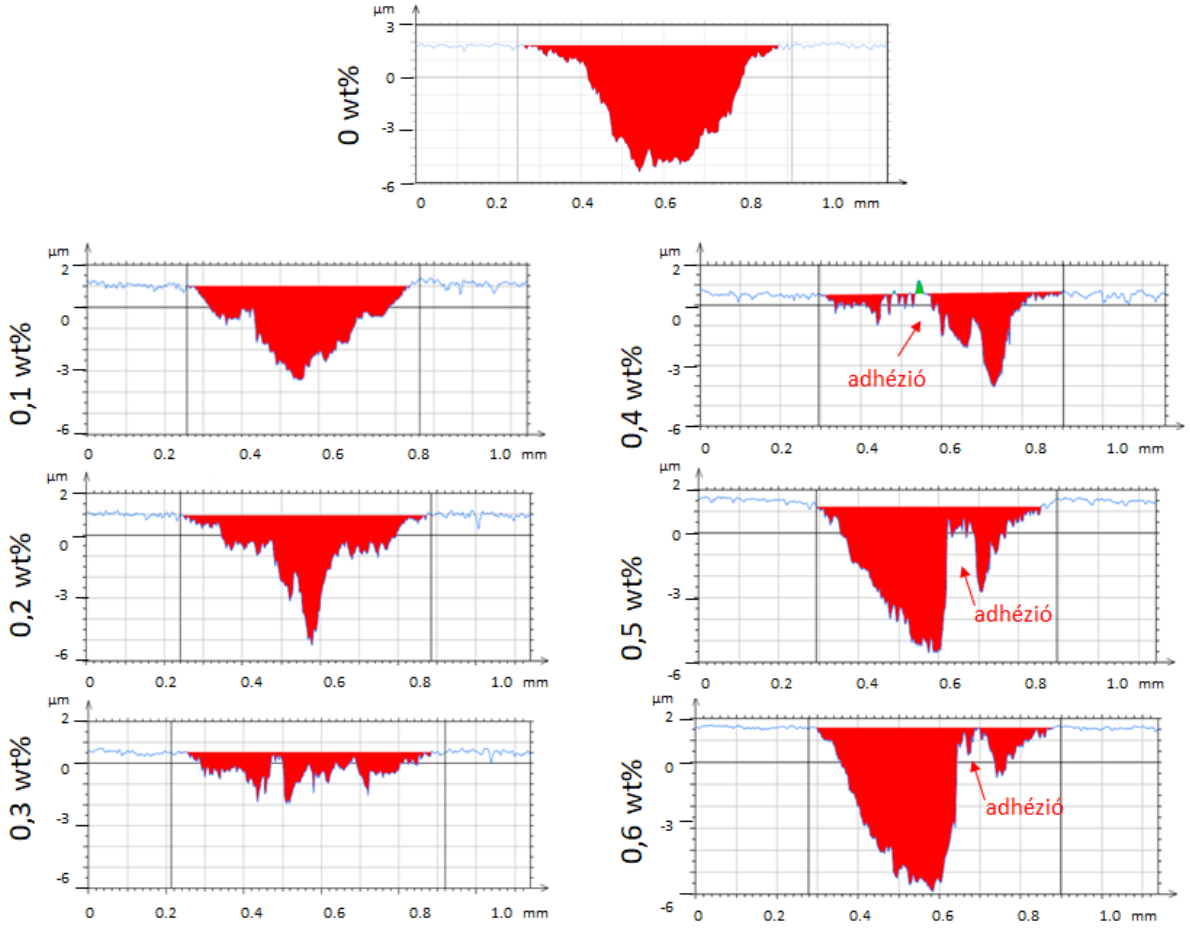
A réz(II)-oxid kerámiával adalékolt kenőolajmintákkal elvégzett tribológiai vizsgálatok konfokális mikroszkópos elemzésének eredményeit ismerteti a 76. ábra. Az oszlopdiagram egyértelműen szemlélteti a mért kopástérfogati eredményeket és azt, hogy a legalacsonyabb kopást a 0,3 tömegszázalékos koncentráció eredményezte. A golyón keletkezett kopáskép átmérője és a mért kopástérfogat két különböző optimum koncentrációt eredményezett, amely

arra enged következtetni, hogy a kopástérfogatmérés sokkal precízebb eredményt szolgáltat, hiszen a vizsgálat során a tárcsa próbatesten keletkezett teljes kopásképp elemzésre kerül. Továbbiakban az is megállapítható, hogy a CuO adalék kettős eredményeket szolgáltat: az adalék vagy alacsony súrlódási együttható mellett képes üzemelni (0,5 tömegszázalék esetén 8% súrlódási együttható csökkenés 21% kopástérfogat csökkenés mellett), vagy a kopás mennyiségét képes csökkenteni (0,3 tömegszázalék esetén 69% kopástérfogat csökkenés 7% súrlódási együttható növekedés mellett). A súrlódási és kopási eredményeket összegezve egy jó kompromisszumos koncentráció a 0,4 tömegszázalék, amely 3%-os súrlódáscsökkenés mellett 12%-kal csökkentette a kopásátmérőt és 62%-kal a kopástérfogatot [157].



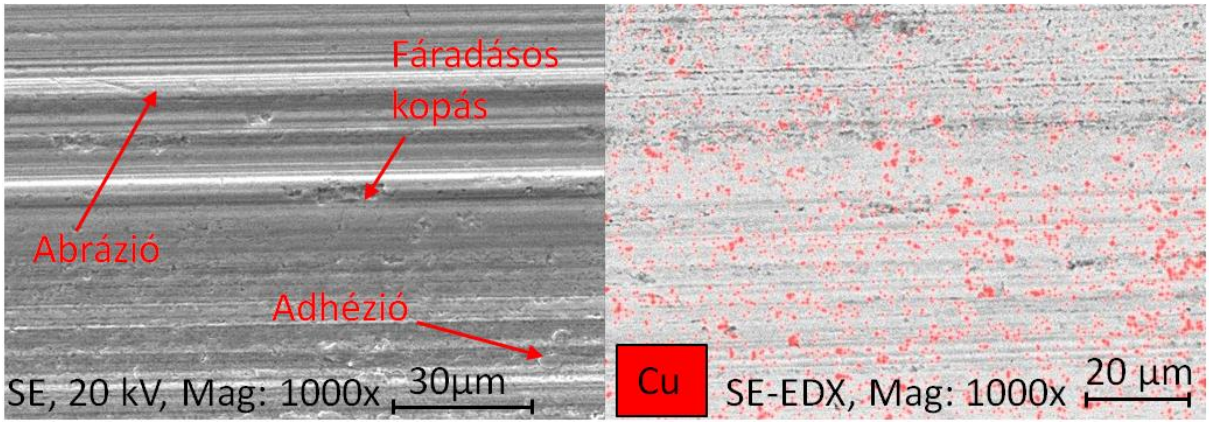
76. ábra: Réz(II)-oxid nanométerű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményei, különböző nanorészecske-koncentrációk okozta kopástérfogatok összehasonlítása

A 77. ábra a digitalizált tárcsa kopásképek keresztmetszeti elemzésének képeit mutatja. A képek rávilágítanak a konfokális mikroszkópos elemzés egyik hátrányára: mivel a berendezés fénynyalábokkal működik, nem képes különbséget tenni a felület kiinduló anyagminősége és a tribológiai vizsgálat során áthegedt idegen anyag között. Azonban az eredmények egyértelműek, hiszen az alacsony nanorészecske-koncentráció megnövekedett abráziós kopásnyomokat mutat, a túl magas koncentráció pedig az összehegedéses kopást erősíti. A kopástérfogat szempontjából optimálisnak adódó 0,3 tömegszázalékos minta esetén is megfigyelhető alacsony szintű adhézió, azonban az adott mennyiségű CuO részecske elegendő tribológiai védelmet biztosít a tribológiai rendszer számára [157].



77. ábra: Réz(II)-oxid nanométerű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményei, tárcsa kopásnyom keresztmetszeti felvételeinek összehasonlítása

A felületek elektronmikroszkóppal való elemzése rávilágított arra a tényre, amely a digitális mikroszkópos felvételek alapján sejthető volt: a kopott felületen található rézsárga réteg a tribológiai vizsgálat során a felületre tapadt réz. A 78. ábra elektronmikroszkópos felvétele bizonyítja, hogy a felületen jelentős mennyiségű réz található. Továbbiakban a felületen felfedezhető három különböző kopási jellemző is: az abráziós nyomok mellett adhéziós nyomok és fáradásos kopásra utaló nyomok is megfigyelhetők [156-157].



78. ábra: 0,5 tömegszázalékos nanoméretű réz-oxiddal adalékolt kenőolajminta tárcsa próbatesten okozta kopáskép elektronmikroszkópos elemzésének eredménye 1000x-es nagyítással

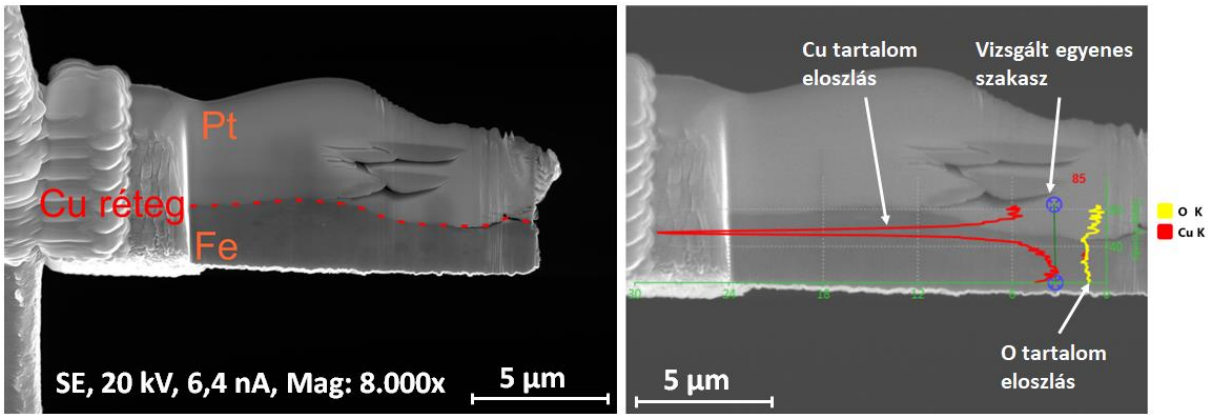
Az elektronmikroszkópos vizsgálat során a felület legkülső rétegének elemösszetétele is meghatározásra került. Az eredményeket a 12. táblázat ismerteti. Az eredmények egyértelműen a réz elem jelentősen megnövekedett értékét mutatják a felületen. A 9,25% réz szignifikánsnak tekinthető, hiszen az előzőekben ismertetett cirkónia esetén ez a szám csak 4,28% volt. Érdekes tendenciát mutat az oxigén elem változása is, hiszen a réz arányának emelkedésével nem növekszik az oxigén mennyisége. Ezen jelenség magyarázható akár a felület alacsonyabb korróziójával is, illetve azzal, hogy a réz elem négyszer magasabb atomtömeggel rendelkezik, mint az oxigén. Azonban az is lehetséges, hogy a kopott felületen talált réz és oxigén nem CuO vegyületként jelenik meg a felületen, hanem valamilyen más vegyület formájában (pl: elemi réz, vagy Cu_2O) [156-157]. A réz és az oxigén megjelenési formájának pontosabb elemzéséhez további vizsgálatok elvégzése vált indokolttá.

12. táblázat: Réz(II)-oxid kerámiával adalékolt olajmintával végzett vizsgálatok során a tárcsa próbatesten keletkezett kopás felületének elem eloszlása

Elem	Fe	Cr	Si	O	C	Cu
0% CuO	82,21%	1,16%	1,88%	8,14%	6,61%	0%
0,5% CuO	75,23%	1,20%	0,69%	7,18%	6,45%	9,25%

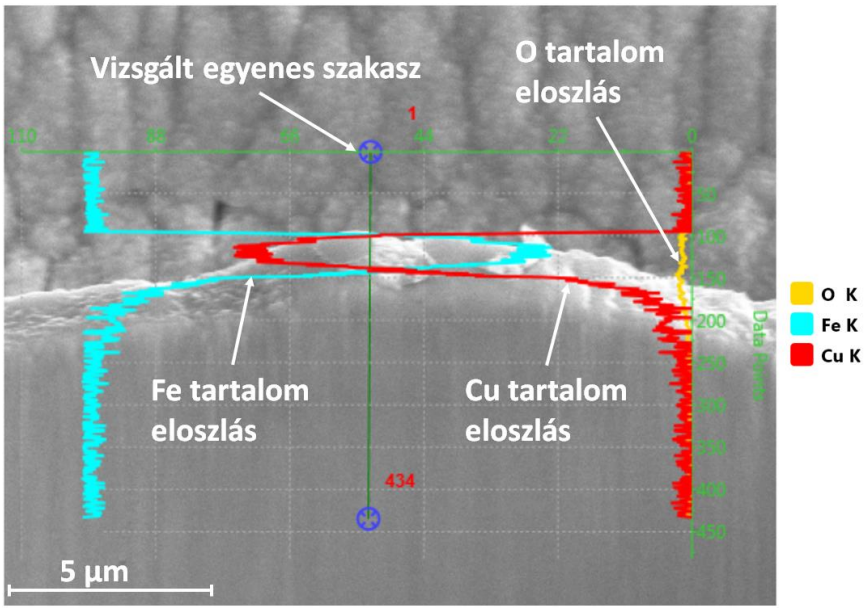
A további vizsgálatokhoz a Miskolci Egyetemen található PFIB-SEM berendezés került alkalmazásra, hiszen a magasabb nagyítási arány lehetősége mellett lamellákat és felületi metszeteket is lehet készíteni. A 79. ábra a 0,5 tömegszázalékos olajmintával végzett tribológiai vizsgálatok egy olyan eredményét mutatja, ahogy a tárcsa próbatestből került egy

lamella kimunkálásra. A lamella kimunkálása során a vizsgálandó felület platinával került letakarásra, hogy a megmunkálás során ne változzon semmilyen tulajdonsága. Az elkészített lamella vastagsága nagyjából 1 µm lett. Az elemvizsgálat az ábrán jelölt vonal mentén került elvégzésre, és a réz és oxigén vonalmenti eloszlása került ábrázolásra. Az eredményekből egyértelműen látszik, hogy a réz eloszlása nem korrelál az oxigén eloszlásával. A mért oxigén jel valószínűleg a minta korróziójából származhat. Az elektronmikroszkópos vizsgálat során egyértelműen meghatározható a felületen egy vékony réz réteg, amely a vas alapanyagú tárcsa felületére rátapadt [157].



79. ábra: 0,5 tömegszázalékos nanométerű réz-oxiddal adalékolt kenőolajminta tárcsa próbatesten kopásképéből merőleges irányban kimunkált lamella elemzése, réz- és oxigén-tartalom eloszlásának vizsgálata

A kopásképre merőleges irányban egy lépcsőzetes metszet is készült, amely ionsugárral került kialakításra. Ezen lépcsőzetes metszet lehetőséget kínál arra, hogy az elektronmikroszkóp detektoraival a lépcsőzetesen kimunkált helyre illesztve a felületről metszeti elemzést végezzünk. A metszet fókuszált ionsugárral készült. A metszeti vizsgálat eredményét a 80. ábra ismerteti. A metszeti elemzés a lamellás elemzéshez hasonló eredményt szolgáltatott, hiszen egy egyértelmű réz réteg azonosítható a felületen, amely mélységi eloszlásához az oxigén eloszlása nem korrelál. A vastartalom fordított arányosságban áll a réztartalommal, amely azzal magyarázható, hogy az adott helyen magassági irányban vékony, azonban egyértelmű réz-réteg került az alapvetően vasból készült tárcsa próbatestre és ez a metszeti képben így jelenik meg. Továbbá az a következtetés is megerősíthető, hogy a vizsgálat során mért oxigén elsősorban a felületen található vas oxidációjából származhat [157].



80. ábra: 0,5 tömegszázalékos nanoméretű réz-oxiddal adalékolt kenőolajminta tárcsa próbatesten kopásképéből merőleges irányban ionsugárral kimunkált metszet elemzése, réz- és oxigén-tartalom eloszlásának vizsgálata

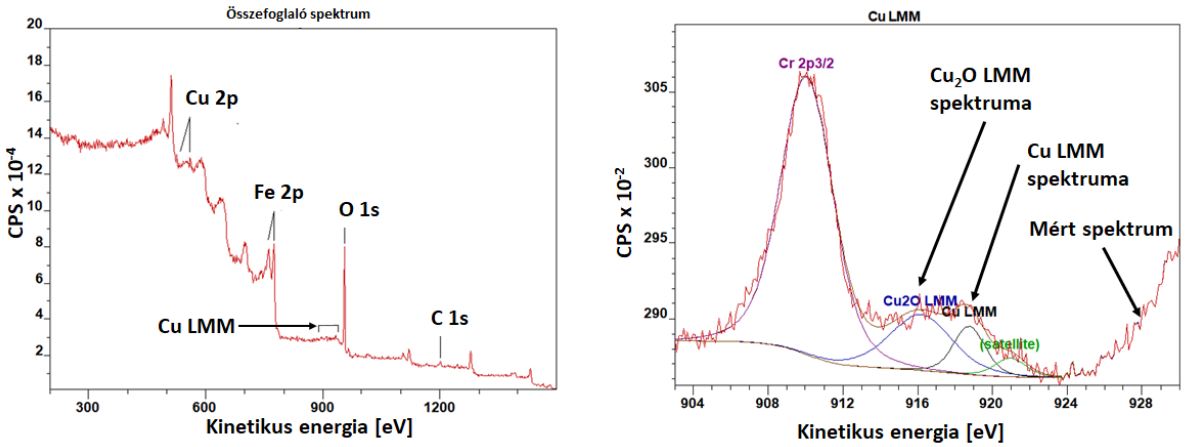
Megfigyelhető az eredmények alapján, hogy a tribológiai vizsgálat során az érintkező felületekre réztartalmú vegyület tapadt fel, és ezen réteg okozta a kimért pozitív tribológiai tulajdonságokat. Azonban a réteg vizsgálatából még nem derült ki, hogy a réz milyen vegyület formájában található meg a felületen. Több lehetséges variáció merült fel lehetőségként, mint például az elemi réz, CuO, esetleg Cu_2O. Ezen információ egy úgynevezett röntgen-fotoelektron spektroszkópia (XPS – X-ray photoelectron spectroscopy) segítségével meghatározható. A vizsgálandó felületet a debreceni Atommagkutató Intézetben található XPS berendezés segítségével sikerült elemezni.

A röntgen-fotoelektron spektroszkópia alkalmas a felületeket, vagy vékonyréteg anyagokat vizsgálva (5-10 nm rétegmennyiség) információt nyújtani az anyag elektronjainak kötési energiájáról, amely az adott elem adott kémiai állapotára jellemző mennyiség [158].

A méréshez Al/MG kettős anóddal rendelkező, monokromátor nélküli röntgenforrást és Phoibos100 MCD-5 félgömbstabilizátort (SPECS, Berlin) használtunk. A spektrumok 1486 eV-os Al K-α sugárzással készültek. A mintadarabon jelen lévő olajréteg eltávolítása érdekében a mérés előtt a mintát egyszer acetonban, egyszer pedig kloroformban tisztítottuk ultrahangfürdővel, 3-3 percen át, majd száraz nitrogénsugárral szárítottuk. A nem illékony és nem oldódó felületi szennyezőket ionporlasztásos felülettisztítással távolítottuk el, közvetlenül a mérés előtt. A tisztítás végétől a mérés kezdetéig a minta folyamatosan nagyvákuumban került tárolásra, a mérés során pedig ultravákuum került alkalmazásra.

A spektrumok a CasaXPS programmal kerültek feldolgozásra, a jelpozíciók a szén jeléhez kerültek korrigálásra. A jeleket kevert Gauss/Lorentz görbékre bontottuk fel, Shirey alapvonal-korrekció után [156-157].

A mintáról készült összefoglaló spektrum (81. ábra, bal) alapján megállapítható, hogy a vizsgált felület igen kis hányada áll rézvegyületekből. Ez a besugárzott (7 x 20 mm) és a réztartalmú (~ 1 x 1,5 mm) felületek közti méretkülönbségből adódik. A réz 2p csúcsának jel/zaj aránya emiatt nem megfelelő ahhoz, hogy érdemi információt nyújtson. A réz LMM Auger tartományában viszont a réz különböző oxidációs állapotainak energiái közti különbség nagyobb, kevésbé fednek át az egyes kémiai állapotokhoz rendelt csúcsok, tehát kis intenzitás esetén megbízhatóbb információhoz jutunk. A réz LMM Auger tartományáról felvett részletes spektrumot a 81. ábra jobb oldali diagramja mutatja. A jelek felbontása után a csúcsok pozíciói megmutatják az egyes rézvegyületek anyagminőségét, jel alatti területeikből pedig kiszámolható, hogy milyen arányban vannak jelen. A számítás eredményeképp megállapítottuk, hogy a felületen található réz két vegyületként jelenik meg: 69,6 atomszázalékban Cu_2O (kötési energia 570,43 eV), illetve elemi réz (kötési energia 567,83 eV) 30,4 atomszázalékban [156-157].



81. ábra: 0,5 tömegszázalékos nanométerű réz-oxiddal adalékolt kenőolajminta tárcsa próbatesten elvégzett XPS analízis eredménye, balra az összehasonlító spektrum, jobbra az LMM Auger spektrum

Ezek az eredmények azt mutatják, hogy a súrlódásos vizsgálat során a CuO redukción ment keresztül, Cu_2O-t és elemi rezet eredményezve. Ezen anyagok felületen való jelenléte a következő folyamatok mentén alakulhatott ki [156-157].

- Mivel a vas erősebb redukálószer, mint a réz (a vas standard elektródpotenciálja E° = -0,44 V, a rézé pedig +0,337 V), ezért a vas oxigént vonhat el a réz-oxidokból, ha ezt a körülmények engedik (a két anyagnak érintkeznie kell, magas hőmérsékleten).
- Az adalékként használt réz-oxid a súrlódásos vizsgálatok során használt 100°C hőmérsékleten képes lehet reakcióba lépni a használt Group III típusú bázisolajjal (a Group III bázisolaj C20 és C50-es szénhidrogének keverékéből áll) és elemi rézzé redukálódni.
- A réz akár már az összekevert olaj-adalék fázisban elkezdhetett redukálódni, amennyiben a rendszer szabad energiája ezt lehetővé teszi. A vizsgálatok során használt magas hőmérséklet, illetve a súrlódási energia átalakulása során keletkezett hő tovább fokozhatta a réz redukciós folyamatát.

A rendszerben kialakult elemi réz az alacsony keménysége miatt könnyen kenhető állapotú, így a súrlódásos vizsgálatok során csekély ellenállás mellett képes feltapadni, felhegedni a súrlódó felületre, ott egy tribológiai védőréteget képezve csökkentheti a súrlódási együttható értékét, illetve a tapasztalható kopás nagyságát [156-157].

Korábbi tanulmányok már foglalkoztak hasonló vizsgálatokkal: Tarasov és társai [159] megvizsgálták az elemi réz olaj-adalékként való alkalmazásának lehetőségeit és az elemi réz tribológiai tulajdonságait. Ebben a tanulmányban különböző védőgázok alatt csomagolt elemi rezet kevertek széria-motorolajba és ezek tulajdonságait vizsgálták. Az elemi réz védőgáz alatti csomagolása ilyen esetben elengedhetetlen, mivel az ilyen kis szemcseméretű réz-részecskék nagyon hamar képesek reagálni a levegő oxigénjével. A tanulmányban szintén megállapítják, hogy a réz az alacsony keménysége miatt könnyen feltapad a súrlódó felületre, feltölti vagy betakarja a kopott árkokat, védőréteget képezve a felületen. A tanulmány következtetésként levonja, hogy a legjobb védőgáz a nitrogén (N_2), illetve amennyiben nem csak argon, hanem argon-oxigén keverék alatt csomagolják a rezet, akkor az oxidálódott réz jobban csökkentheti a tribológiai tulajdonságokat. Ez azzal magyarázható, hogy a réz-réteg kialakulása után az oxidálódott réz bekerülhet a két súrlódó felület közé, ott nano gördülőcsapágyként viselkedik, jótékony tribológiai hatásokat biztosítva a rendszer számára.

Továbbiakban elemzésre került, milyen folyamat mentén alakulhatott ki a használt réz(II)-oxid tribológiai redukciója. A réz könnyen redukálható magas hőmérséklet hatására, különböző réz oxidok keletkeznek a reakció hatására. A vizsgált tribológiai rendszerben nagymennyiségben vannak jelen a bázisolajat felépítő különböző szénhidrogének. A szénhidrogének és a magas hőmérséklet hatására kialakulhat az említett réz redukció, amely

eredményét a vizsgálati próbatestek kopott felületei ismertetnek. A redukció aránya és sebessége növekedett azáltal is, hogy az általunk elemzett réz(II)-oxid nanoméretű (30-50 nm) gömbök formájában volt jelen a redukció során [157].

A Boudouard reakciót alapul véve, a vizsgálat során fellépő magas nyomás és hőmérséklet hatására a CuO nanorészecskék redukálódhattak. A redukció bizonyítására Gibbs-féle szabadentalpia számításokat végeztem. A számítások kiindulásaként az alábbi két megállapításnak kell teljesülnie:

- $\Delta S_{univerzum} = \Delta S_{rendszer} + \Delta S_{környezet} > 0$
- Az univerzum mindig energiaminimumra, illetve entrópiamaximumra törekszik.

A folyamatok irányát a szabadentalpia minimuma határozza meg. Az entrópia termodinamikai definíciója az anyagok Q hőmennyisége (termikus energiája) segítségével adható meg. Legyen szó akár gázról, folyadékról vagy szilárd anyagról, annak atomjai, molekulái rendezetlen mozgásokat végeznek, amelyhez kinetikus energia tartozik. Ennek összege képezi a termikus energiát, azaz a hőmennyiséget. A termikus energia és a hőmérséklet aránya definiálja az entrópiát:

$$S = \frac{Q}{T} \tag{6.1}$$

A termodinamikai potenciál azt az energiát adja meg, amely maximálisan átalakítható egy másik energia típussá egy adott folyamatban. A Gibbs-féle szabad energia kiszámítható az entalpia és az entrópia segítségével az alábbi képlet alapján:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \tag{6.2}$$

Amennyiben a rendszer nyomását és hőmérsékletét állandónak tekintjük, az egyenlet leegyszerűsödik:

$$dG \leq \mu \cdot dN \tag{6.3}$$

Ebből az megállapítható, hogy a G szabadentalpia legfeljebb annyit változhat, amennyi a μ·dN kémiai munkavégzés. Tehát a szabadentalpia megmutatja, hogy a belső energiából legfeljebb mekkora rész alakítható kémiai munkává izobár és izoterm folyamatban. Ezek alapján a 6.2. képlet segítségével meghatározható a feltételezett folyamatok létrejöttének lehetősége.

- A negatív előjelű szabadentalpia-változás azt jelenti, hogy a folyamat az adott irányban önként, spontán bekövetkezhet.
- A pozitív előjelű szabadentalpia-változás azt jelenti, hogy a folyamat önként, spontán módon nem következik be.
- Ha a szabadentalpia-változás nulla, akkor a rendszer egyensúlyban van.

A használt bázisolaj pontos CAS-számát a gyártó megadta (CAS 64742-54-7 és 72623-87-1, [143]), és a pontos adatok alapján megállapítható, hogy a használt bázisolaj különböző hosszúságú szénhidrogének keverékéből áll. Ezen szénhidrogének 20 és 50 közötti szénatom számmal rendelkeznek. Bár a használt bázisolaj pontos összetétele ezek alapján nem ismert, az tudható, hogy a vegyületben található dekán ($C_{10}H_{22}$). A dekán vegyülethez a Gibbs-féle szabadentalpia számításához szükséges adatok irodalmi forrásból elérhetők [160], így a továbbiakban a használt Group III típusú bázisolaj a számításokban a dekánnal helyettesített. A dekánt nem csak bázisolajokban használják, hanem gyakran üzemanyagokban is.

A számítások során az alábbi redukciós folyamatokat feltételeztem (6.4 és 6.5 egyenlet) és arra a kérdésre kerestem a választ, hogy a feltételezett reakciók egyike a vizsgálati hőmérsékleten spontán végbemegy-e:

$$CuO + C_{10}H_{22} \xrightarrow{redukció} Cu + CO + H_2 + C_9H_{20} \tag{6.4}$$

$$CuO + C \xrightarrow{redukció} Cu + CO \tag{6.5}$$

A réz(II)-oxid reakcióba lép a dekánnal és redukálja azt az alkánban lévő szén segítségével. Ezzel az alkán szénlánca eggyel rövidül (nonán), miközben elemi réz alakul ki szén-monoxid és hidrogéngáz jelenlétében. A tribométeres mérés üzemi hőmérséklete 373,15 K, azonban a szükséges termodinamikai értékek egységesen 400 K hőmérsékleten találhatók meg, ezért erre a hőmérsékletre végeztem el a számításokat. A 13. táblázat ismerteti a Gibbs-féle szabadentalpia számításokhoz szükséges adatokat, irodalmi forrás alapján.

13. táblázat: A Gibbs-féle szabadentalpia meghatározásához szükséges adatok ([160], szerzői módosítással)

T = 400 K	CuO	Cu	C	CO	$C_{10}H_{22}$	C_9H_{20}	H_2
S [J/molK]	55,727	40,481	8,754	206,25	518,314	477,245	139,216
ΔH [kJ/mol]	-155,551	0	0	-110,129	-312,086	-285,578	0

A dekánnal való reakció során felírható az entrópia változása 400 K hőmérsékleten:

$$\Delta S = \sum S_{ki} - \sum S_{be} \tag{6.6}$$

$$\Delta S = (40{,}481 + 206{,}25 + 139{,}216 + 477{,}245) - (55{,}727 + 518{,}314) = \\ = 289{,}151 \left[\frac{J}{mol \cdot K}\right] \tag{6.7}$$

amely érték egy spontán kémiai reakciót jelent.

Az entrópia mellett a dekánnal való reakció entalpiájának változása is felírható 400 K hőmérsékleten:

$$\Delta H = \sum \Delta H_{ki} - \sum \Delta H_{be} \tag{6.8}$$

$$\Delta H = (0 - 110{,}129 + 0 - 285{,}578) - (-155{,}551 - 312{,}086) = 71930 \left[\frac{J}{mol}\right] \tag{6.9}$$

amely egy endoterm folyamatot jelent.

A szabadentalpia számításokhoz szükséges még megadni az entalpia és entrópia változás adatait a szénnel való reakció során. A számítások eredményeit a 6.10.-es illetve a 6.11.-es egyenlet tartalmazza:

$$\Delta S = (40{,}481 + 206{,}25) - (55{,}727 + 8{,}754) = 182{,}25 \left[\frac{J}{mol \cdot K}\right] \tag{6.10}$$

$$\Delta H = (0 - 110{,}129) — 155{,}551 + 0 = 45422 \left[\frac{J}{mol}\right] \tag{6.11}$$

amelyek szintén spontán, illetve endoterm folyamatot eredményeznek.

Az előbb ismertetett adatok alapján felírhatók és kiszámíthatók a feltételezett redukciós folyamatok Gibbs-féle szabadentalpia értékei, mind a dekánnal való redukcióra (6.12. egyenlet), mind pedig a szénnel való redukcióra (6.13. egyenlet).

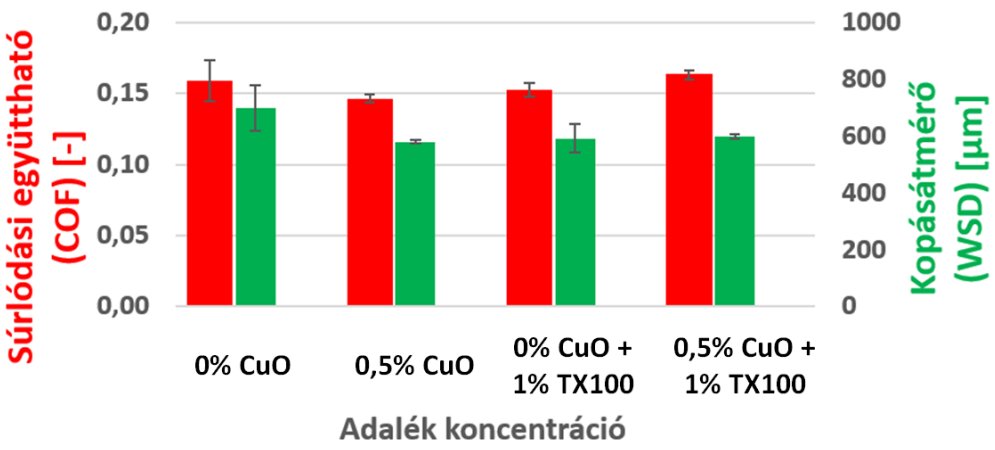
$$\Delta G = 71930 - 400 \cdot 289{,}151 = -43730{,}4 \left[\frac{J}{mol}\right] \tag{6.12}$$

$$\Delta G = 45422 - 400 \cdot 182{,}25 = -27478 \left[\frac{J}{mol}\right] \tag{6.13}$$

Itt fontos megjegyezni, hogy ez a reakció idealizálja a bázisolaj összetételét. A valós alkánok, melyek a bázisolaj összetevői magasabb atomszámmal rendelkeznek, viszont a redukció folyamata megegyezik. A Group III típusú bázisolajat C20 és C50 szénhidrogének alkotják, ezáltal a tényleges üzemi hőmérsékleten mindkét anyag entrópiája jóval magasabb (~1000-1200 J/mol·K) a táblázatban felírthoz képest, azonban emelkedésük mértéke közel azonos, így ez a ΔS mértékét csak kis mértékben befolyásolja [157].

A reakcióban az entrópia- és az entalpiaváltozás értéke is pozitív. Ez azt mutatja, hogy a reakció spontán endoterm folyamat. Tehát van egy adott hőmérséklet, mely felett a szabadentalpia értéke negatív és a reakció végbemegy. A számítások alapján ez a hőmérséklet érték 250,84 K, vagyis -22,31°C. E hőmérséklet felett spontán módon létrejön a felírt reakció, alatta pedig nem (mert a számításokat -22,31°C alatti hőmérsékleten elvégezve a Gibbs szabadentalpia értéke pozitív lenne) [157].

A 82. ábra ismerteti a CuO adalék és a triton együttes alkalmazásának vizsgálati eredményeit. A vizsgálatokhoz a korábbiakban megállapított optimális CuO koncentrációs mintát használtam és ilyen CuO koncentrációval készítettem el a 0,5% CuO + 1% TX100-as olajmintát. Az ábrázolt oszlopdiagram alapján megállapítható, hogy az olajmintához hozzáadott triton nem javított a vizsgálati rendszer tribológiai tulajdonságain (7% súrlódási együttható növekedés és 1% kopásátmérő növekedés). Ellentétben a triton nélküli vizsgálatokkal, ahol a mért adatok csökkenő tendenciát mutattak (8% súrlódáscsökkenés és 17% kopásátmérő csökkenés). A továbbiakban a vizsgálati olajmintákhoz nem adagoltam extra felületaktív diszpergens adalékot, mivel az eredmények ezt nem indokolták.

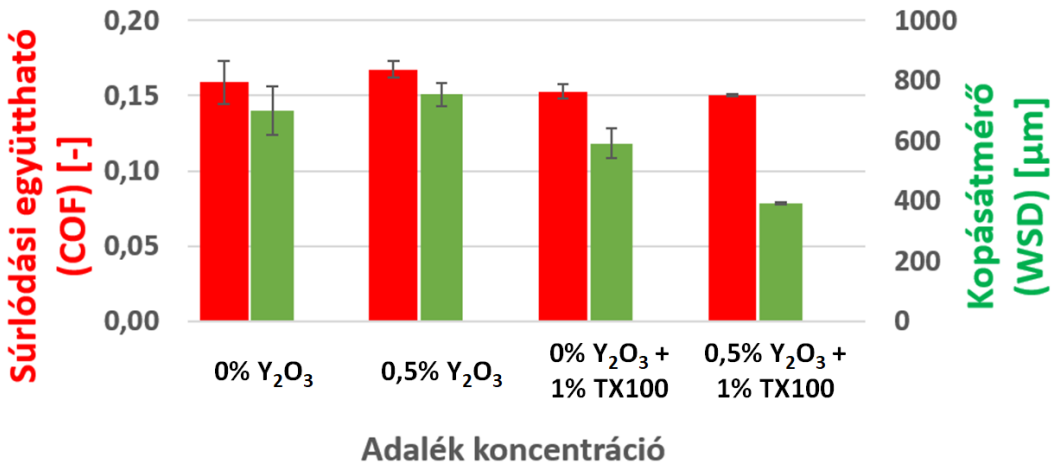


82. ábra: Réz(II)-oxid nanoméretű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményeinek összehasonlítása, triton diszpergens szükségességének vizsgálata

A nanoméretű réz(II)-oxid kerámiaszemcsékkel elvégzett tribológiai vizsgálatok eredményei alapján egyértelműen megállapítható a CuO szemcsék működési mechanizmusa. A tribológiai vizsgálat során a CuO nanoszemcsék a magas hőmérséklet és a magas kontaktnyomás hatására reakcióba lépnek a bázisolajat felépítő szénhidrogénekkel, amely reakció során réz-redukció jön létre. Ezen elemi réz jelentősen puhább, mint az eredeti CuO szemcse, így könnyen képes megtapadni a próbatestek érintkező felületeire. A kontaktfelületre tapadt réz kismértékben csökkenti a súrlódási együtthatót és jelentősebben a kopási értékeket. Az XPS elemzés során a felületen meghatározott Cu_2O magas aránya azzal magyarázható, hogy a felületre felkenődött réz a tárolás és szállítás során képes reakcióba lépni az oxigénnel és az említett vegyületet létrehozni [157].

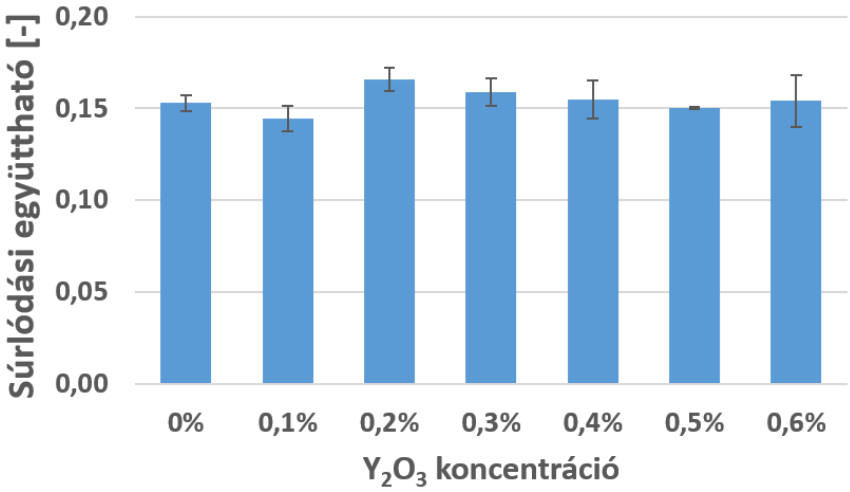
8.4. Ittrium(III)-oxid nanokerámia szemcsékkel elvégzett vizsgálatok eredményei

Az ittrium(III)-oxid nanoméretű kerámiaszemcsékkel adalékolt bázisolaj minták tribológiai vizsgálatánál az első körben azt vizsgáltam meg, hogy az ittria szemcsék számára szükség van-e extra homogenizáló adalék, jelen esetben X100-as triton jelenlétére. Ezen lépésre az ittria szemcsék csekély számú irodalmi forrása alapján volt szükség. Az ittria nanoszemcsékkel elvégzett előkészítő vizsgálatok eredményeit a 83. ábra ismerteti. Az eredményekből könnyen kivehető, hogy az ittria nanoszemcsék csak akkor képesek pozitív tulajdonságokat biztosítani a tribológiai rendszer számára, ha kiegészítésként felületaktív diszpergens adalékot, jelen esetben X100-as tritont is keverünk az olajmintához [161]. A továbbiakban minden vizsgálatot tritonnal adalékolt ittria szemcsékkel végeztem el és az eredmények is ezen mintákkal kerültek ábrázolásra.



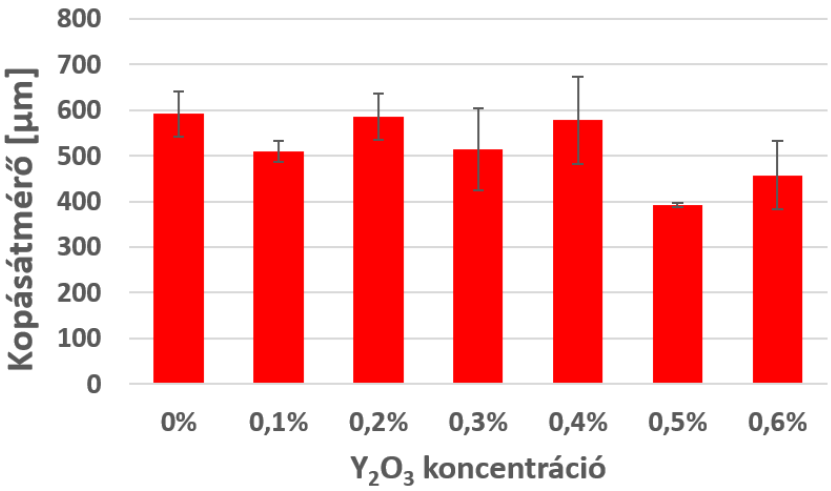
83. ábra: Ittria nanométerű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményeinek összehasonlítása, triton diszpergens szükségességének vizsgálata

A tribológiai vizsgálatok során mért súrlódási együtthatók (84. ábra) összehasonlításakor megállapítható, hogy az ittriával erősített olajminta csak nagyon kis mértékben képes csökkenteni a súrlódást. A 0,1 tömegszázalékos koncentráció esetén mérhető 5,5%-os javulás nevezhető az ittria szemcsék súrlódási optimumának, azonban megjegyzendő, hogy az egymástól független mérések során megfigyelt szórásmező több esetben átfedésben van. Továbbiakban megfigyelhető, hogy a 0,5 tömegszázalékos minta kevesebb, mint 2%-os súrlódáscsökkenést eredményezett úgy, hogy a mért szórásmező alig mérhető értéket ad [161].

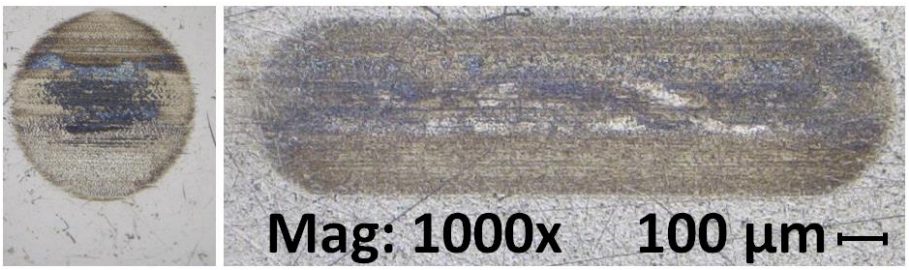


84. ábra: Ittria nanométerű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményei, különböző koncentrációk súrlódási együtthatóinak összehasonlítása

A golyó próbatestek felületén mérhető kopásátmérő adatok kiértékelésének eredményeit a 85. ábra ismerteti. Az oszlopdiagram egyértelműen kimutatja, hogy a súrlódási együttható alapján megfigyelt optimum koncentráció (1 tömegszázalék) pozitívan hat a kopásra, azonban a 0,5 tömegszázalékos minta kopásgátló tulajdonságai még inkább kiemelkedők. Ezen koncentráció esetén 44%-os kopásátmérő-csökkenés tapasztalható. Szintén megjegyzendő, hogy a 0,5 tömegszázalékos koncentráció esetén mérhető szórásmező nagysága minimális, a tribológiai vizsgálatok megismételhetősége ezen olajminta esetén kiemelkedően pozitív. A kopásképek vizsgálata során érdekes tendencia figyelhető meg: a kopásképeken (86. ábra) jellemzően az elszíneződés dominál, komolyabb tribológiai kopást és károsodást nem lehet észlelni. A tárcsa próbatesten keletkezett kopáskép esetén a legtöbb helyen az eredeti felületi érdességi árkok még megfigyelhetők. A vizsgálati próbatestek érintkező felületeinek mikroszkópos felvételei megerősítik a kopásátmérő mérések eredményeit, miszerint a 0,5 tömegszázalékos olajminta kiváló kopásgátló tulajdonságokat biztosított a vizsgálati próbatestek számára [161].

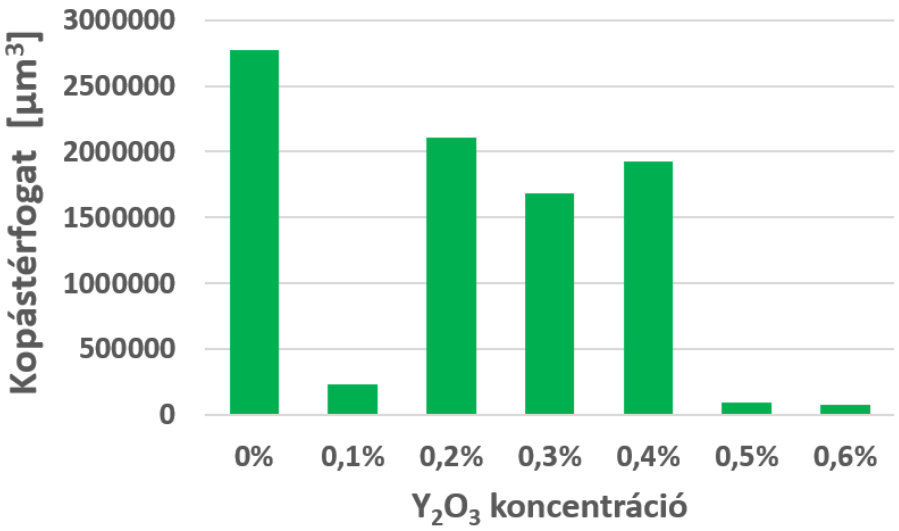


85. ábra: Ittria nanoméretű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményei, különböző nanorészecske-koncentrációk okozta kopásátmérők összehasonlítása



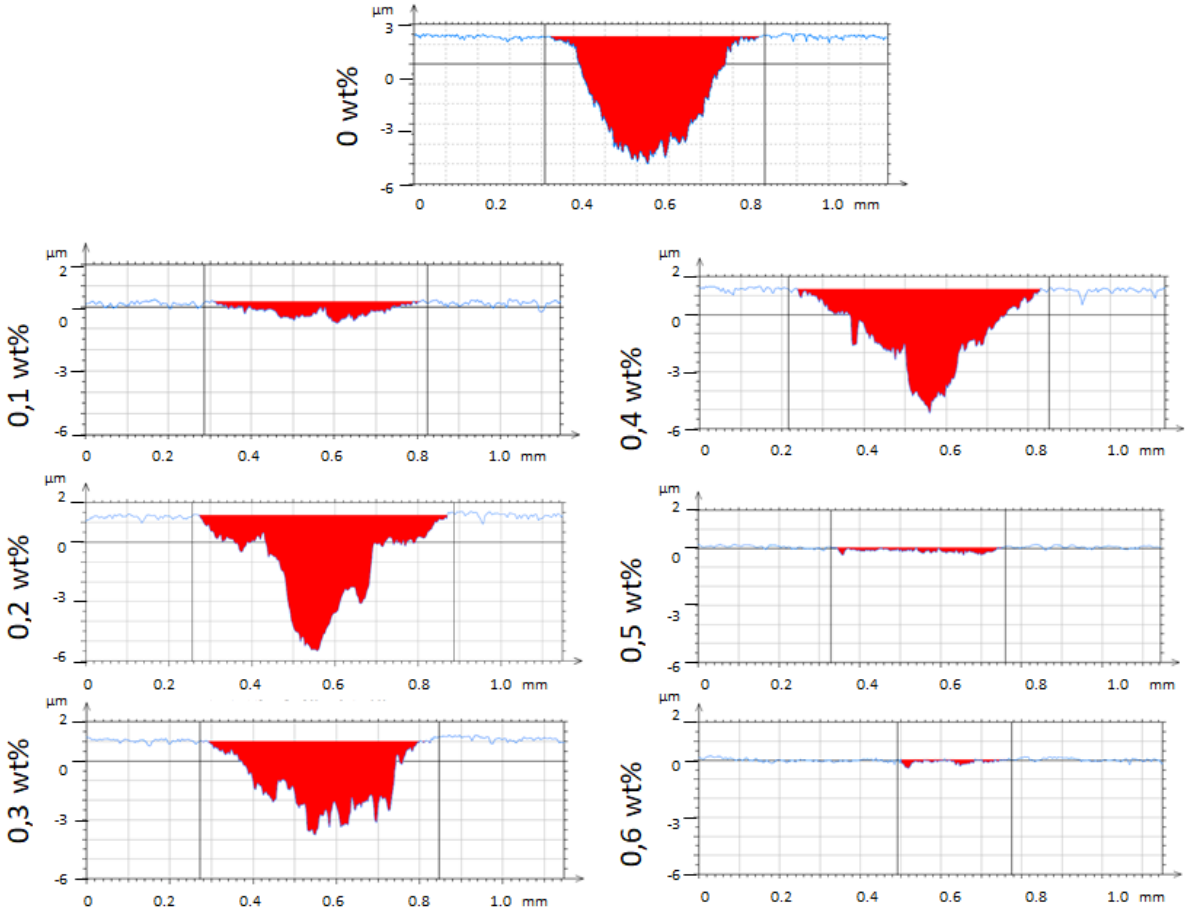
86. ábra: 0,5 tömegszázalékos ittria szemcsével adalékolt olajminta okozta kopásképek a golyó és tárcsa próbatesteken, digitális mikroszkópos felvétel, 100x-os nagyítással

A tárcsa érintkező felületéről hiányzó anyagmennyiség ezen adalék esetén is konfokális mikroszkóppal került elemzésre és kiértékelésre. A 87. ábra ismerteti a mérési eredmények összesítését. Az eredmények alapján megállapítható, hogy mind az alacsony (0,1 tömegszázalék), mind a magasabb (0,5 és 0,6 tömegszázalék) adalék-koncentrációs minták pozitívan hatottak a vizsgált tribológiai rendszer kopására. Kiemelendő a 0,5 és 0,6 tömegszázalékos minta, amelyek esetén 96-97%-os kopástérfogat-csökkenést lehetett realizálni. Ezen kopásmennyiség szinte elhanyagolható érték és összesítve a súrlódási együtthatók és kopásátmérők értékeivel, egyértelműen egy megegyező tendencia mutatkozik.



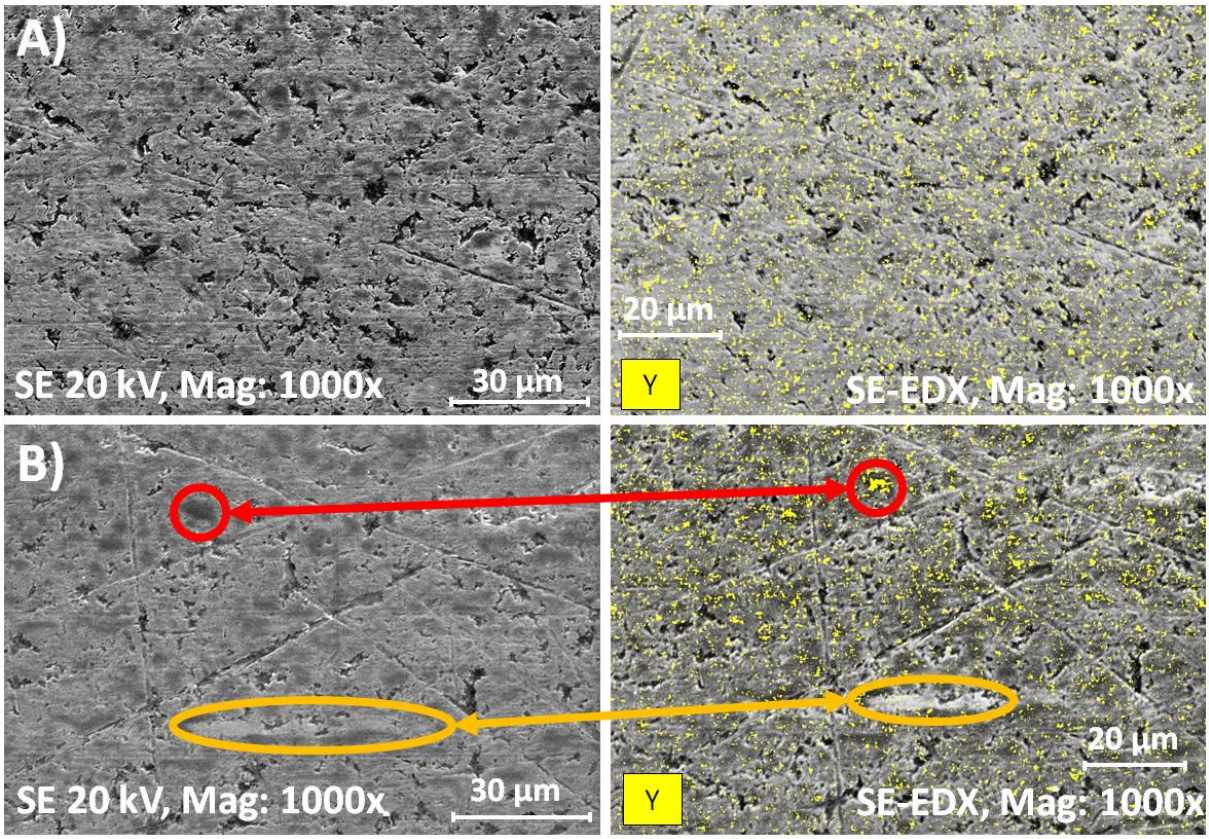
87. ábra: Ittria nanométerű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményei, különböző nanorészecske-koncentrációk okozta kopástérfogatok összehasonlítása

A tárcsán keletkező kopásképe keresztmetszeti elemzése (88. ábra) az eddigiekben megállapított tendenciát megerősíti, hiszen a 0,1, és még inkább a 0,5 tömegszázalékos minta esetén a kopásmélység alig észrevehető, a legmélyebb kopási barázda a 0,5 százalékos minta esetén nem éri el a fél nanométer mélységet az eredeti felülethez képest. Ez jelentős javulás a referencia minta által okozott kopásképéhez képest, ahol a legmélyebb kopásárkok elérték a 6 mikrométer mélységet is.



88. ábra: Ittria nanoméretű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményei, tárcsa kopásnyom keresztmetszeti felvételeinek összehasonlítása

A nanoméretű ittria szemcsék működési folyamatainak mélyebb megértése érdekében pásztázó elektronmikroszkópos elemzésnek vetettük alá az optimum koncentrációval készült vizsgálatok kopásképeit. A 89. ábra ismerteti a Hirox típusú elektronmikroszkóppal készített képeket. A kopott felület elemzése kiemelten nehéz volt, hiszen a próbatesten található szinte elhanyagolható mértékű kopásmélység megnehezítette a fókuszpont megtalálását. Az elektronmikroszkópos elemzés bebizonyította azt, hogy az átlagos kopásmélység olyan alacsony mértékű, hogy a felület eredeti struktúrája és ezáltal az eredeti érdességi árkok a kopásképen belül is megfigyelhetők. Ezentúl a felvételeken különböző mértékű sötétebb foltok is megfigyelhetők, ahol az EDX elemanalízis eredménye alapján ittrium-dúsulás tapasztalható (89. ábra, piros színjelzés). Továbbá olyan területek is megjelentek, ahol az ittrium aránya elhanyagolható (89. ábra, narancssárga színjelzés). Kérdésként merül fel, hogy ez az ittrium-eloszlás különbség mivel magyarázható, amely további, nagyobb nagyítású elektronmikroszkópos felvételek elkészítését igénylik [161].



89. ábra: 0,5 tömegszázalékos nanoméretű ittria szemcsékkel adalékolt kenőolajminta tárcsa próbatesten okozta kopáskép elektronmikroszkópos elemzésének eredménye 1000x-es nagyítással, A) löketközép, B) holtpont

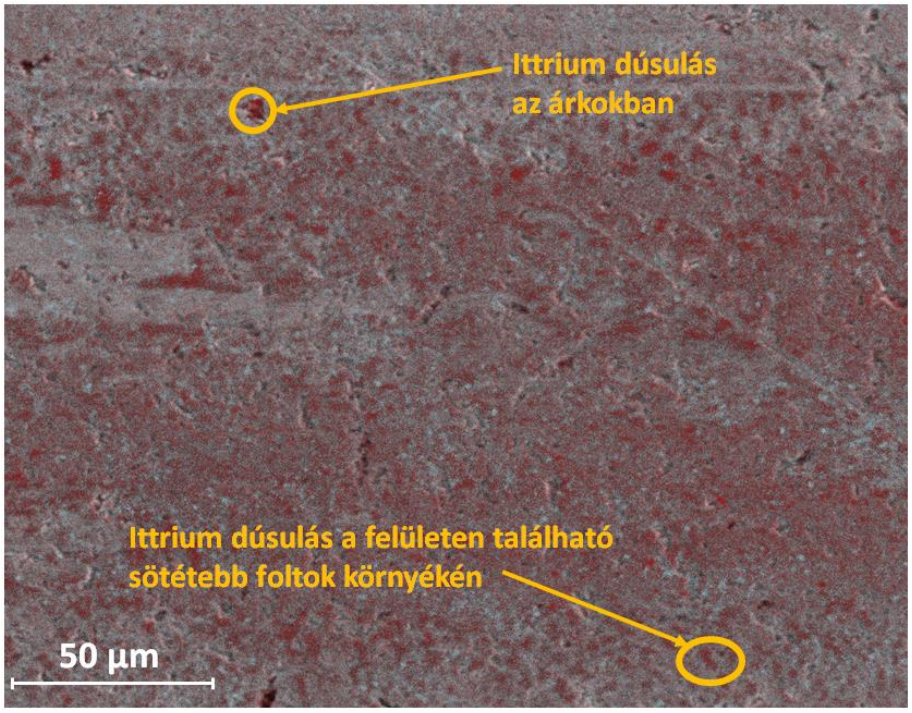
Az elektronmikroszkópos elemzés során készített elemtérkép és a hozzá kapcsolható százalékos elemeloszlás eredményeit a 14. táblázat ismerteti. Az adatok alapján egyértelmű, hogy szignifikánsan növekedett az ittrium felületen található aránya (1,78%-os növekedés). Megfigyelhető azonban, hogy a felületen található 1,78% ittrium még így is jelentősen alacsonyabb érték, mint a más típusú adalékok esetében megfigyelt hasonló számadat (cirkónia esetén 4,28% Zr, míg réz(II)-oxid esetén 9,25% Cu). A vizsgálati próbatestek kopott felületén az oxigén, illetve a szén aránya növekedett jelentősen, amelyek egyértelműen jelzik a felületi korrózió, illetve a felületen megtapadt, ultrahangos tisztítással sem eltávolítható olajminta jelenlétét [161].

14. táblázat: Ittria kerámiával adalékolt olajmintával végzett vizsgálatok során a tárcsa próbatesten keletkezett kopás felületének elem eloszlása

Elem	Fe	Cr	Si	O	C	Y
0% Y_2O_3 + 1% TX100	95,92%	1,34%	0,11%	1,52%	1,11%	0%
0,5% Y_2O_3 + 1% TX100	77,43%	1,24%	1,9%	9,54%	8,11%	1,78%

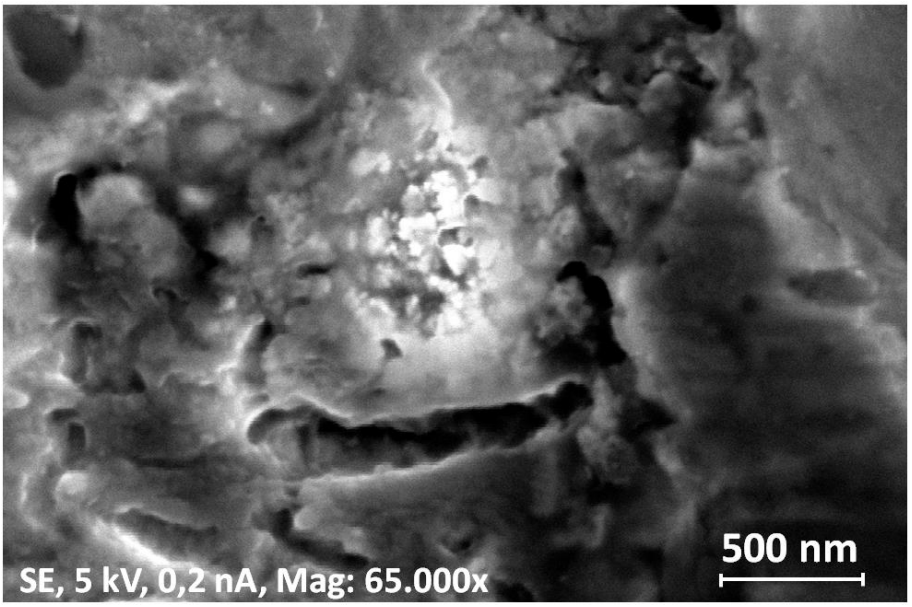
További elektronmikroszkópos felvételek készültek a Miskolci Egyetem 3D laboratóriumában található Thermo Scientific Helios G4 PFIB CXe pásztázó elektronmikroszkóp segítségével. A további elemzés elsődleges célja, hogy a felületen található ittrium pontosabb területi eloszlását meghatározzuk, illetve az ittrium-szegény területekről további információt kaphassunk.

A további elektronmikroszkópos vizsgálatok előtt a próbatest további alapos ultrahangos tisztítási folyamaton esett át. Ezen elektronmikroszkóppal elvégzésre került egy ismétlő mérés, amelynek eredményét a 90. ábra ismerteti. A felvétel alapján megállapítható, hogy a felületen továbbra is jelentős mennyiségű ittrium figyelhető meg. Továbbá megfigyelhető, hogy a felületen kétféle ittrium-dúsulás jelenik meg: a felület árkaiban, illetve a felület felsőbb részeinél található sötétebb elszíneződéseknél. A felvétel alapján bebizonyosodott, hogy a próbatest nem módosult a szállítás és az újabb ultrahangos tisztítás során. Mivel az ittria szemcséket többszöri alapos ultrahangos tisztítás sem volt képes eltávolítani a felületről, így megállapítható, hogy az ittria szemcsék olyan erősségű kötéseket alakítottak ki a próbatest felszínével, amelyet az ultrahangos tisztítási folyamat nem képes eltávolítani.



90. ábra: 0,5 tömegszázalékos nanoméretű ittria szemcsékkel adalékolt kenőolajminta tárcsa próbatest kopásképen elektronmikroszkóp segítségével megfigyelt ittrium-dúsulás a felületi árkokban

Az ittria erősítéses kenőolajmintával vizsgált tárcsa próbatestek felületén további felvételek is készültek, magasabb nagyítási értékekkel. Ilyen felvételeket a felületi árkokról készítettünk elsősorban annak érdekében, hogy megvizsgáljuk, milyen formában található meg az ittria szemcse ezeken a helyeken. A 91. ábra ismerteti az egyik ilyen felvételt. A felvételen láthatók fehér színnel látszódó részek, amelyek formája gömb alakú. Ezen gömb alakú részek azok az ittria szemcsék, amelyek a tribológiai vizsgálat során beépültek a felületi árkokba, feltöltötték azokat, ezáltal egy simább kontaktfelület jött létre, amely segítette a tribológiai terhelés egyenletesebb eloszlását, csökkentve a felület terhelését. Ilyen tekintetben az ittria szemcsék a cirkónia szemcsékhez hasonló tulajdonságokat biztosítanak a vizsgált tribológiai rendszer számára. Az ittria szemcsék feltöltő mechanizmus (28. ábra, b) alapján történő működése az elektronmikroszkópos elemzés során bizonyosodott be. Az árkokban található anyagok elemzése pontszerű EDX módszerrel történt, amelynek eredményeit a 15. táblázat ismerteti. Az eredmények bizonyítják azt, hogy az árkokban található gömb formájú szemcsék azok az ittrium szemcsék, amelyet a tribológiai vizsgálatok során használt kenőolajmintába homogenizálásra kerültek.

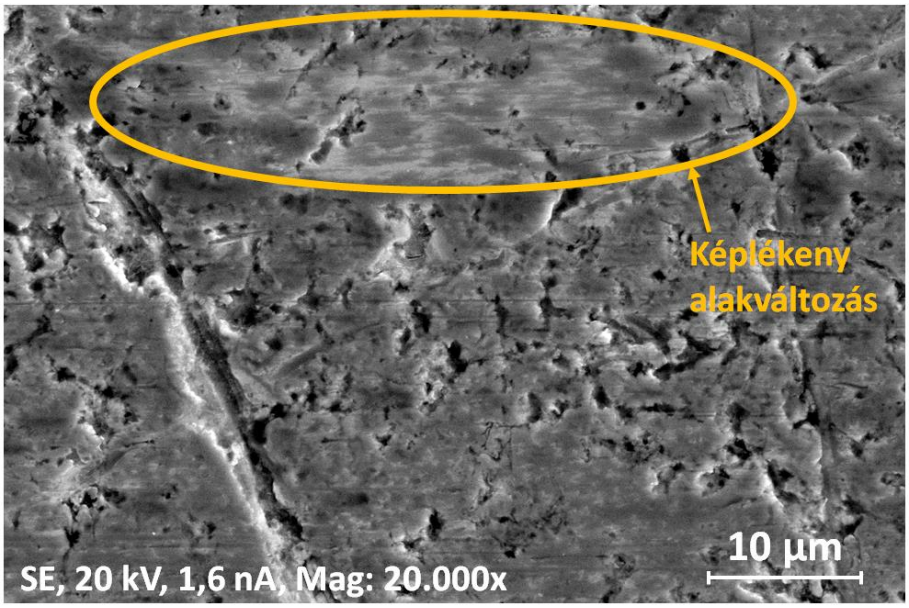


91. ábra: 0,5 tömegszázalékos nanoméretű ittria szemcsékkel adalékolt kenőolajminta tárcsa próbatest kopásképen elektronmikroszkóp segítségével, 65.000x-es nagyításon megfigyelt ittrium-dúsulás a felületi árkokban

15. táblázat: Ittria kerámiával adalékolt olajmintával végzett vizsgálatok során a tárcsa próbatest felületi árkok belsejének pontszerű EDX elemzése

Elem	Fe	Cr	Si	O	C	Y
Tömegszázalék	82,9%	1,0%	2,1%	4,5%	7,3%	2,1%

Továbbiakban a felületeken megjelent ittrium-szegény helyekről készültek elektronmikroszkópos felvételek, magasabb nagyítási értékekkel, amelyet a 92. ábra mutat. A felvételeken látható egy olyan felület, amely nem hordozza az eredeti felület textúráját, annak ellenére, hogy a konfokális mikroszkópos elemzés nem mutatott ki mérhető mélységi kopást. A felületrészen látható továbbá fehérebb és szürkébb terület. A felületelem kinézetének elemzése során megállapítható, hogy a tárcsa érintkező felülete ezen a helyen képlékeny alakváltozást szenvedett. Az alakváltozás hatására az egymással érintkező felületek érintkezési aránya megnövekedett, tovább csökkentve az egységnyi felületre ható terhelést, a felületi nyomást. Ezen felületrész jellemző a polírozó mechanizmusra (28. ábra, c), azzal a különbséggel, hogy az ittria szemcsék esetében nem történt anyagleválasztás. A felületen megfigyelt képlékeny alakváltozást eddig egyik, általam vizsgált kenőolajminta esetében sem sikerült megállapítani, így kijelenthető, hogy a nanoméretű ittria szemcsék elősegítették a felület mikro szinten történő képlékeny alakváltozását.



92. ábra: 0,5 tömegszázalékos nanométerű ittria szemcsékkel adalékolt kenőolajminta tárcsa próbatest kopásképen elektronmikroszkóp segítségével, 20.000x-es nagyításon megfigyelt képlékeny alakváltozási területek

A nanométerű ittrium(III)-oxid kerámia szemcsékkel adalékolt kenőolajminták tribológiai elemzésének összefoglalásaként megállapítható, hogy a tribológiailag optimális koncentráció 0,5 tömegszázalékos értékre adódott, homogenizáló TX100-as adalék jelenléte mellett. Ezen részecske koncentráció esetén jelentős, 97%-os kopástérfogat-csökkenést mutattam ki. Az elektronmikroszkópos felületanalízis jelentős mennyiségű ittrium jelenlétét mutatta ki a felületen, amely az egész felületen megtalálható, nagyobb koncentrációban a felületi árkokban. Továbbá, a tárcsa próbatest kontaktfelületén szabad szemmel nem látható képlékeny alakváltozási területek figyelhetők meg, amelyek szintén a felületi nyomás egyenletesebb eloszlását segítik. Az eredmények alapján megállapítható az ittria nanoszemcsék működési mechanizmusa, amely kettős: a szemcsék feltöltötték a felületi árkokat, illetve képlékeny alakváltozást hoztak létre a felületen. Mindkét mechanizmus elősegítette a tribológiai terhelés egyenletes eloszlását, ezáltal csökkentve a kopás mennyiségét és növelve a próbatestek élettartamát.

Az ittrium(III)-oxid magas beszerzési költségeit is figyelembe véve egy kiemelkedően jó megoldás lehet a 0,1 tömegszázalékos koncentráció is, hiszen az ezen olajmintával elvégzett mérési eredmények alapján 5%-os súrlódáscsökkenést, 14%-os kopásátmérő csökkenést és 91%-os kopástérfogat csökkenést állapítottam meg. Ezen eredmények nagyon közel állnak az optimális 0,5 tömegszázalékos mintával elvégzett mérések eredményeihez.

9. Összegzett következtetések

Kutatásaim során arra a következtetésre jutottam, hogy a jelenleg is hatályos ISO 19291:2016-os szabvány szerint elvégzett kenőolaj összehasonlító vizsgálatok (Optimol SRV®5 tribométer, golyó-tárcsa próbatest párosítás és 0,3 ml térfogatú kenőolaj) valósághűsége nem felel meg a járműipar jelenlegi komplex igényeinek. Egy olyan vizsgálati módszert fejlesztettem ki, amely egy folyamatos keringtetésű olajrendszerrel helyettesíti a szabvány által előírt alacsony térfogatnyi olajmintát. Az általam módosított vizsgálati módszer alapján elvégzett vizsgálatok pontosabb és valósághűbb eredményeket biztosítanak, hiszen a súrlódás okozta hőfejlődés a folyamatosan keringő olaj által elvezetésre kerül a súrlódó rendszerből, így nem hevül túl a kontaktfelület és az ott található olajminta. A vizsgálati módszerhez elkészítettem egy olyan leírást és munkautasítást is, amely elősegíti a mérések megismételhetőségének magas szinten tartását.

Az irodalomkutatás eredményei alapján megállapítottam, hogy jelenleg nincs széleskörben elterjedt egységes nanorészecske-olaj homogenizálási metódus, ezért egy egyedi keverési folyamatot definiáltam, amellyel a vizsgálatokhoz szükséges szemcse-olaj minta homogén állapotban és reprodukálhatóan létrehozható.

A 15-25 nm közötti átlagos szemcseméretű cirkónium(IV)-oxid részecskék tribológiai vizsgálata során megállapítottam azt az optimális részecske-koncentrációt (0,4 tömegszázalék), amely során a vizsgálati rendszer a legalacsonyabb súrlódási együtthatóval és kopásveszteséggel képes üzemelni (84%-os kopástérfogat csökkenés számottevő súrlódásnövekedés nélkül). A szemcsék működési mechanizmusainak vizsgálatai során megállapítottam, hogy a felület érdességi árkaiban feldúsul a cirkónia koncentráció, így a szemcsék feltöltik az árkokat és egyenletesebb érintkező felületet biztosítanak az egymáson elmozduló érintkező felületelemek számára.

Bázisolajba kevert, 50 nm-nél kisebb átlagos szemcseméretű réz(II)-oxid szemcsék tribológiai vizsgálatai során megállapítottam, hogy az optimális koncentráció jelenléte mellett szignifikáns súrlódáscsökkentés (8%) és kopástérfogat-csökkentés (21%) realizálható. A vizsgálati próbatesteken megjelenő rézsárgás réteg elemzése alapján kijelentem, hogy a felületre réz(I)-oxid és elemi réz tartalmú védőréteg rakódik fel a tribológiai vizsgálat során. Gibbs-féle szabadentalpia számításokkal bizonyítottam, hogy a tribológiai vizsgálat során fellépő hőmérsékleti peremfeltételek mellett a réz(II)-oxid spontán módon elemi rézzé redukálódik a bázisolajat felépítő hosszú szénláncú molekulákkal való reakció során.

A nanoméretű (<50 nm) ittrium(III)-oxid kerámia szemcsékkel adalékolt kenőolaj minták tribológiai vizsgálatai alapján megállapítható, hogy a szemcsékkel erősített olajminta 0,5 tömegszázalékos koncentráció jelenlétében csekély súrlódáscsökkentés (2%) mellett jelentős, 97%-os kopástérfogat-csökkentést eredményez. Az elektronmikroszkópos elemzés során kimutattam az ittria szemcsékkel adalékolt olajminták kettős működési mechanizmusát. A szemcsék a felületi árkok feltöltése mellett szabad szemmel nem látható képlékeny deformációs területeket eredményeznek a felületen, amelyek elősegítik a tribológiai rendszer magasabb élettartamát.

10. Új tudományos eredmények összefoglalása

1. tézis [s5]

Megvizsgáltam Castrol 5W-30 típusú, személygépjárművekben használt motorolaj tribológiai tulajdonságait az ISO 19291:2016 jelzetű szabvány szerint, Optimol SRV®5 tribométerrel, szabványos anyagú és méretű próbatestekkel és mérési programmal. Mértem a súrlódási együttható értékét és megvizsgáltam a kopási képet.

Az érintkező felületeken kialakult összehegedéses kopás alapján megállapítottam, hogy a jelenleg hatályos, kenőolajok tribológiai tulajdonságainak vizsgálatára vonatkozó ISO 19291:2016 jelzetű szabvánnyal végzett vizsgálatokkal nem szimulálhatók megfelelően a belsőégésű motorokban fellépő tribológiai folyamatok. A módszert tovább fejlesztettem és meghatároztam a motorolajok minősítésére alkalmazható optimális vizsgálati paramétereket. 0,3 ml kenőolaj tribológiai rendszerhez való egyszeri hozzáadása helyett a mérőberendezéshez tartozó perisztaltikus pumpával megvalósított folyamatos keringtetésű olajrendszer (225 ml/h térfogatáram) alkalmazásával kimutattam, hogy a próbatesteken keletkezett kopás 150 N terhelés és 100 °C megválasztásával 120 perces vizsgálati idő mellett nem mutatja a magas arányú összehegedéses kopás jeleit. Továbbá megállapítottam, hogy a súrlódási együttható időbeli lefutása közelebb áll a belsőégésű motorban tapasztaltakhoz, összehasonlítva a szabvány szerint elvégzett mérések eredményeivel.

2. tézis [s6 – s10]

Group III-as típusú bázisolajba 15-25 nm átlagos szemcseméretű ZrO_2 részecskéket kevertem és megvizsgáltam a tribológiai tulajdonságait. A vizsgálatokat az Optimol SRV®5 típusú tribométerrel, szabványos golyó és tárcsa próbatestekkel, 100 N terheléssel 100°C vizsgálati hőmérsékleten 225 ml/h-s folyamatos keringtetésű kenőolajrendszer alkalmazásával végeztem el, 120 perc vizsgálati idővel. A keletkezett kopásképeket digitális, konfokális és pásztázó elektronmikroszkópokkal elemeztem.

A) A nanoméretű cirkónium(IV)-oxid kerámia szemcsék kenőolaj-adalékként való alkalmazhatóságát tribológiai modellkísérletekkel bizonyítottam. 0 és 0,6 tömegszázalékos koncentráció tartományban vizsgálva az általam megállapított optimális ZrO_2-koncentráció 0,4 tömegszázalék. Méréseim során bizonyítottam, hogy ez az összetétel 84%-os kopástérfogat és 40 százalékos kopásátmérő csökkenést eredményez szignifikáns súrlódásnövekedés nélkül a nanokerámia adalék nélküli olajjal mért értékekhez képest.

B) Nagy nagyítású pásztázó elektronmikroszkópos felületelemzés segítségével kimutattam, hogy a nanoméretű cirkónium(IV)-oxid kerámiával erősített kenőolajminta alkalmazása során a kerámia szemcsék összegyűlnek az érintkező felületek érdességi vagy kopási árkaiban, és feltöltve azokat képesek nagyobb érintkezési felülettel rendelkező tribológiai kontaktfelületet biztosítani az egymáson súrlódó próbatesteken. Megállapítottam, hogy az így kialakult tribológiai kontaktfelület elősegíti a tribológiai terhelés egyenletes eloszlását, amely kopáscsökkentő hatást eredményez a tribológiai rendszer számára.

3. tézis [s7, s9, s11, s12]

Az 50 nanométernél kisebb átlagos szemcseméretttel rendelkező réz(II)-oxid kerámiaszemcsék tribológiai tulajdonságait Group III-as típusú bázisolajba keverve elemeztem golyó-tárcsa modellkísérletekkel. A vizsgálatokhoz 100 N terhelést, 100°C vizsgálati hőmérsékletet és 225 ml/h sebességű folyamatos keringtetésű olajrendszert alkalmaztam. A vizsgálati próbatesteken keletkezett kopásképeket digitális, konfokális, és pásztázó elektronmikroszkópokkal, illetve röntgen-fotoelektron spektroszkópiás eljárással elemeztem.

A) Bebizonyítottam, hogy 0-0,6 tömegszázalékos koncentráció tartományban vizsgálva nanoméretű réz(II)-oxid kerámiaszemcsék kenőolaj-adalékként való alkalmazhatóságát, 0,5 tömegszázalék CuO mellett optimális tribológiai tulajdonságokat biztosít a kenőolaj számára. Az optimális koncentráció esetében a referenciaként használt adalék nélküli bázisolajhoz viszonyítva 8%-os súrlódáscsökkentést és 21%-os kopástérfogat-csökkentést állapítottam meg.

B) A CuO részecskékkel erősített kenőolajminták elemzése során sárga elszíneződést figyeltem meg a próbatestek felületén. A kopott felületek nagy nagyítású elektronmikroszkópos elemzése során, energia-diszperzív röntgen spektroszkópia analízissel (EDX) megállapítottam, hogy ez egy jelentős réz-tartalmú réteg A felület röntgen-fotoelektron spektroszkópiás elemzése alapján kimutattam, hogy ez a réteg réz(I)-oxidot (Cu_2O), és elemi rezet tartalmaz. Az elemi réz keletkezésének magyarázása céljából Gibbs-féle szabadentalpia számításokat végeztem el és bebizonyítottam, hogy a vizsgált tribológiai rendszerben a réz(II)-oxid reakcióba lép a bázisolajat felépítő hosszú szénláncú szénhidrogénekkel (mint dekán), amely reakció során a CuO elemi rézzé redukálódik.

Mikroszkópos felvételekkel bizonyítottam, hogy az elemi réz alacsony keménysége miatt képlékeny alakváltozást szenved a tribológiai vizsgálat során és rátapad a súrlódó felületekre, ezáltal mintegy tribológiai védőrétegként segítve a fellépő súrlódási és kopási veszteségek csökkentését.

4. tézis [s13]

Megvizsgáltam az 50 nanométernél kisebb átlagos szemcseméretttel rendelkező ittrium(III)-oxid nanoszemcsékkel adalékolt Group III típusú bázisolaj tribológiai tulajdonságait. A vizsgálatokhoz szabványos golyó és tárcsa próbatesteket használtam 100 N terhelés, 100°C hőmérséklet és 225 ml/h-s folyamatos keringtetésű kenőrendszer jelenléte mellett. A próbatestek felületén keletkezett kopásképeket digitális, konfokális és pásztázó elektronmikroszkópos felületelemzésnek vetettem alá.

A) A nanoméretű ittrium(III)-oxid kerámiaszemcsékkel erősített kenőolajminta tribológiai vizsgálatai során megállapítottam, hogy a vizsgált 0-0,6 tömegszázalékos tartományban a 0,5 tömegszázalékos nanorészecske koncentráció tekinthető optimálisnak 1% homogenizáló diszpergens (TX100) adalék jelenléte mellett. Ezen összetételű olajminta jelentős kopásgátló tulajdonságokat biztosít a tribológiai rendszer számára. Az optimális nanorészecske-koncentráció jelenléte esetén 2% súrlódáscsökkentés mellett 97%-kal csökkent a tárcsa próbatesten keletkezett kopástérfogat mértéke az adalék nélküli olajmintával elvégzett mérésekhez képest oly módon, hogy a legtöbb helyen az eredeti felület struktúrája látható maradt.

B) A kopáscsökkenés bizonyítására elektronmikroszkópos elemzést alkalmaztam, melynek során az ittrium(III)-oxid kerámiaszemcsék kettős működési mechanizmusát állapítottam meg. Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálattal és EDX analízissel kimutattam, hogy a nanoszemcsék kitöltik a felületi érdességi árkokat, alacsonyabb felületi érdességgel rendelkező érintkezési felületet biztosítva a tribológiai rendszer számára. Megállapítottam továbbá, hogy az ittrium(III)-oxid szemcsék elősegítik az érintkező tribológiai felület lokális, szabad szemmel nem látható képlékeny alakváltozását, amely szintén segíti a tribológiai terhelés kontaktfelületen történő egyenletesebb eloszlását.

11. Összefoglalás és további kutatási irányok

Doktori értekezésemben különböző nanoméretű kerámia szemcsék kenőolaj adalékként való alkalmazhatóságát vizsgáltam. A témaválasztás elsődleges szempontja a tribológia, mint tudományterület folyamatos térnyerése és fontossága volt, illetve a személygépjárművekben fellépő súrlódási és kopási veszteségek csökkentése nem csak az újonnan forgalomba kerülő járművek esetén, hanem a már forgalomban lévő közlekedési eszközök esetén is kiemelt fontosságú.

A kutatás kiindulásaként elemeztem a jelenleg érvényes vizsgálati szabványt (ISO 19291:2016), amely a kenőolajminták tribológiai tulajdonságainak gyakorlati méréseivel foglalkozik. A vizsgálatok alapján rávilágítottam a szabványban ismertetett vizsgálati módszer egy hiányosságára, melynek pótlására egy új vizsgálati módszert fejlesztettem, amely segítségével a vizsgálatok pontosíthatók és az eredmények valósághűsége növelhető. Az újonnan kifejlesztett vizsgálati módszert gyakorlatban teszteltem, melyhez pontos munkautasítást készítettem, ezáltal csökkentve az emberi tényező eredményekre gyakorolt hatását, illetve alkalmassá tettem hallgatói önálló mérésekre.

Rávilágítottam, hogy a nanoméretű szemcsék kenőolajmintába történő homogenizálása kiemelt fontosságú az ilyen típusú vizsgálatok pontosságának és megismételhetőségének biztosítása érdekében. Mivel az irodalomban nem lelhető fel egy egységes homogenizálási módszer, egy önálló módszert fejlesztettem, amely segítségével biztosítható az egymástól független mérések során a kenőolajminta tulajdonságainak állandósága. A homogenizálási módszerről szintén munkautasítást készítettem, ezzel is növelve a keverési módszer megismételhetőségét.

A kutatómunka során három különböző kerámia szemcse tribológiai hatásait vizsgáltam meg: cirkónium(IV)-oxid, réz(II)-oxid és ittrium(III)-oxid. A nanoméretű szemcsékkel elvégzett tribológiai vizsgálatok bebizonyították, hogy az egyes szemcsetípusok esetén egy súrlódás- és kopás szempontjából optimális koncentráció figyelhető meg. A cirkónia szemcsék esetén ezen érték 0,4 tömegszázalékra adódott, és bizonyítást nyert a cirkónia szemcsék feltöltő mechanizmus alapján történő működése. A réz-oxid szemcsék esetén az optimum koncentráció szintén 0,5 tömegszázalék lett, amely pozitív súrlódás- és kopáscsökkentő tulajdonságokat biztosított a rendszer számára. A réz-oxid szemcsék vizsgálata során megállapítottam, hogy a tribológiai vizsgálat során a réz-oxid szemcse reakcióba lép a bázisolajat felépítő szénhidrogénekkel, elemi rézzé redukálódik, amely puhasága miatt könnyen felkenődik az érintkező felületre, és egy védőréteget képezve biztosít

a rendszer számára pozitív tribológiai tulajdonságokat. Az ittrium(III)-oxid szemcsék esetén szintén megfigyeltem egy optimum koncentrációt (0,5 tömegszázalék), amely kiemelkedően pozitív kopásgátló tulajdonságokat biztosított. Az ittria szemcsék működése kettős: feltöltik a felületi árkokat, illetve elősegítik a felület felsőbb rétegeinek képlékeny alakváltozását.

Az általam elért kutatási eredmények bebizonyították, hogy a nanoméretű kerámia szemcsék egy ígéretes kutatási terület, amely folyamatos fejlődése pozitív eredményeket szolgáltat. Minden mechanikai rendszer rendelkezik valamilyen egymáson érintkező felületelemmel, amelyek kenésére folyamatosan szükség lesz, legyen az akár belsőégésű motor, akár váltómű vagy akár elektromos motor. A nanoméretű kerámiaszemcsékben megvan a potenciál, hogy a jövő kenőolajainak adalékaiként használjuk őket. Annak érdekében, hogy ez megtörténhessen, további széleskörű vizsgálatok szükségesek, amelyek mindig felhasználás-specifikusak. A nanoszemcsék belsőégésű motorban való jövőbeli alkalmazása az átlagosnál több figyelmet igényel: a szemcsék szériaérett olajban való tribológiai tulajdonságainak vizsgálata, a szemcsék hatása a kipufogógáz utánkezelő rendszerekre, vagy a motorolaj működés közbeni öregedésre gyakorolt hatásainak elemzése.

A nanoméretű szemcséket jelenleg olyan mechanikai rendszerekben célszerű alkalmazni, amelyek nem rendelkeznek károsanyag kibocsátással (zárt rendszerek, például váltómű), vagy a károsanyag kibocsátás értékei kevésbé bírnak kiemelt fontossággal (harci járművek).

Jelen disszertáció készítése során levont tapasztalatok alapján további kutatási irányok jelölhetők ki. A nanoméretű szemcsékkel adalékolt olajminták homogenizálási folyamatának fejlesztése továbbra is kiemelt fontosságú, és az elkészült szemcse-olaj elegy vizsgálható különböző aspektusok szerint (pl: viszkozitás, szemcse agglomerátum méreteloszlás stb.). További anyagösszetételű szemcsék kutathatók annak érdekében, hogy a különböző felhasználásokhoz a leginkább megfelelő szemcseméret, anyagösszetétel kerüljön felhasználásra. Irodalmi tanulmányok foglalkoznak úgynevezett hibrid adalékokkal is, amelyek esetén a kenőolajminta többféle szemcsetípust is tartalmaz egyidejűleg (pl: ittria erősített cirkónia szemcsék – yttria-stabilised-zirconia). A szervetlen fullerén (IF) típusú adalékok is ígéretesek a réteges szerkezetük miatt, ezen szemcseforma szintén további kutatásokat igényel. Az ionos folyadékok csoportja szintén kutatható irányzat, akár adalékként, akár bázisolajként való felhasználás céljából is. Kutatási tapasztalataim alapján rávilágítottam a nanoméretű szemcsék működési folyamatainak fontosságára, amely indikálhat olyan kutatásokat és fejlesztéseket, amelyek arra irányulnak, hogy speciális adalék-típusokat hozzanak létre, amelyek célzottan az adott folyamat mentén képesek viselkedni.

12. Summary and further research possibilities

In this dissertation I have investigated the applicability of nanoscale ceramic particles in automotive lubricant from tribological aspects. The importance of the chosen topic can be explained with the continuous increasing interest of the tribology as scientific field. Furthermore, the decrease of the frictional and wear losses in the vehicles is also crucial, in case of both the newly developed and used vehicles.

During my research, I revealed the imperfection of the standardised ISO 19291:2016 lubricant analysation method. I developed a new measurement method that provides stable and more accurate tribological results. I have identified the homogenisation of nanoparticle-lubricant mixtures as one of the key factors during these experiments, and a standardised mixing method cannot be found nowadays. I have developed an own homogenisation method that produces more accurate and more precise nanoparticle-lubricant mixtures.

During the research project, three different nanoparticles were experimentally analysed with a simplified ball-on-disc tribological system on an Optimol SRV®5 tribometer. The results with zirconium dioxide nanoparticles have revealed positive antiwear properties in the presence of the defined 0.4% optimal concentration. I discovered the working mechanism of the ZrO_2 with the application of high-resolution microscopy, they can fill up the valleys and grooves of the surface resulting in a smoother contacting surface. The cupric oxide (CuO) nanoparticles have provided both friction and wear reduction and they have formed a thin protective layer on the contacting surface. With the help of Gibbs free enthalpy calculations, I proved, that the copper can be easily reduced from the CuO particles in the presence of hydrocarbons of the lubricants on the environmental conditions during the tribotests. I also investigated the tribological properties of yttrium oxide nanoparticles which has provided an astonishing 97% wear volume reduction in the presence of the optimal NP concentration. I have defined a double working mechanism of the yttria particles: they can fill up the valleys and grooves and they can microscopically deform the top layers of the contacting surface resulting in a smoother contacting surface.

The established excellent tribological properties of nanoparticles can serve as a basis for further, more accurate investigations (e.g., fired engine test bench measurements), which can help produce particle-containing lubricants for different commercial applications (e.g. passenger car). Furthermore, other nanoparticles can be examined (e.g., yttria-stabilised-zirconia) to discover the best nanoparticle material for different applications in the future.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni azok segítségét, akik nélkül jelen disszertáció nem készülhetett volna el:

- Dr. Kuti Rajmundnak, akinek iránymutatása és hasznos tanácsai nélkül ezen értekezés nem készülhetett volna el,
- Dr. Jan Rohde-Brandenburger és Dr. Jan Knaup tanszékvezetőknek, akik mindig is támogattak a disszertáció elkészítése közben,
- Csepreghy Dóra Olimpiának, Nagy Boglárkának, Szabó Ádám Istvánnak, illetve Horváth Andrásnak, akik segítsége nélkül a kutatómunka, illetve a gyakorlati vizsgálatok elkészülte lehetetlen lett volna,
- Dr. Perger Józsefnek és Dr. Raffai Péternek, akik szakmai tanácsaikkal segítették a kutatás folyamatos előremenetelét,
- az Audi Hungaria Zrt.-nek, akinek financiális segítsége nélkül a gyakorlati mérések elvégzésére nem lett volna lehetőség,
- a MOL-LUB Kft. munkatársainak, akik a bázisolaj-mintákat biztosították a kutatásomhoz,
- Dr. Mertinger Valéria professzorasszonynak és Leskó Mátának a PFIB SEM mérésekben való támogatásukért,
- Dr. Fodor Tamásnak és Dr. Takáts Viktornak a kopásfelületek XPS elemzésében nyújtott segítségéért,
- Dr. Zsoldos Ibolya tanszékvezetőnek, akinek fontos szakmai tanácsaira mindig is számíthattam,
- Dr. Hanula Barna dékán úrnak, aki a kritikus helyzetekben szakmai és szakmán túlmutató útmutatást adott,
- menyasszonyomnak, Dórának, aki a legnehezebb helyzetekben is támogatott,
- családomnak, akikhez mindig fordulhattam, ha tanácsra volt szükségem.

Ábrajegyzék

1. ábra: Fosszilis tüzelőanyagok aránya a világ energiafogyasztásában [2] 4
2. ábra: Különböző ipari ágazatok energiafelhasználásának százalékos eloszlása ([3], szerzői módosítással) 5
3. ábra: Megújuló energiaforrás-kapacitás és az aktuális energia igény (lila szín) összehasonlítása a német áramfogyasztásban, 2018. január első felében [2] 6
4. ábra: Különböző járműhajtások széndioxid-kibocsátása élettartam-elemzés alapján, a kínai járműveket figyelembe véve ([5, 7-9], szerzői kiegészítéssel) 7
5. ábra: Különböző járműhajtások széndioxid- és emberi toxicitás növelő egyéb gázok kibocsátása élettartam-elemzés alapján, a litván járműveket figyelembe véve ([6, 9-19], szerzői kiegészítéssel) 7
6. ábra: A tribológiai rendszer sematikus ábrája ([25], szerzői módosítással) 10
7. ábra: A súrlódási együttható és az olajréteg vastagság összefüggése, Stribeck-görbe ([24], szerzői módosítással) 12
8. ábra: A súrlódási állapotok sematikus ábrái, A) száraz súrlódás, B) határréteg súrlódás, C) kevert súrlódás, D) folyadék súrlódás ([24], szerzői módosítással) 13
9. ábra: A súrlódási folyamat energiaáramlási formái ([25], szerzői módosítással) 15
10. ábra: A kopás mennyiségének időbeli eloszlása ([24], szerzői módosítással) 16
11. ábra: Az alapvető kopási mechanizmusok egyszerűsített ábrázolása ([25], szerzői módosítással) 17
12. ábra: Viszkozitás hőmérsékletfüggése három különböző folyadékminta esetében, a) parafinos bázisolaj, b) naftán bázisolaj, c) repceolaj ([23], szerzői módosítással) 19
13. ábra: A viszkozitási index grafikai ábrázolása ([23], szerzői módosítással) 20
14. ábra: Kenőolaj adalékok csoportosítása ([23], szerzői kiegészítéssel) 21
15. ábra: A Bowden-Taylor féle határréteg modell ([29], szerzői módosítással) 22
16. ábra: Súrlódási együttható (Stribeck-görbe), kenőfilm vastagság és kopás a fellépő relatív sebesség függvényében ([33], szerzői módosításával) 24
17. ábra: Viszkozitás hőmérsékletfüggése különböző SAE olajtípusok esetén ([34], szerzői módosításával) 24
18. ábra: Ionos folyadékok anionos és kationos struktúrájának példája ([29], szerzői módosításával) 26
19. ábra: Tribológiai vizsgálati szintek és vizsgálati technikák ([25], szerzői módosítással) 30
20. ábra: Fischer Scientific GSA által gyártott ultrahangos homogenizáló [53] (balra) és Witec Labortechnic GmbH által forgalmazott MS-20D mágneses keverő [54] (jobbra) 32
21. ábra: Anton Paar SVM 3001-es kinematikai viszkozitás mérő berendezés [55] 32
22. ábra: Különböző próbatest-párosítások tribológiai vizsgálatok elvégzésére [57] 33
23. ábra: Irodalomban fellelhető vizsgálati berendezések eloszlása ([58-62], szerzői kiegészítéssel) 34

24. ábra: Különböző nanoadalékok okozta kopásképekről optikai mikroszkóppal készült felvételek [66] 36
25. ábra: Konfokális mikroszkóppal készült felvétel és az abból nyerhető felületi érdességi profil [40] 36
26. ábra: A radioniklud technikás online kopásmérési eljárás sematikus ábrázolása ([70], szerzői módosítással) 38
27. ábra: Nanométerű részecskék morfológiai eloszlása, ([75], szerzői kiegészítéssel) 41
28. ábra: Nanométerű kenőolaj adalék részecskék lehetséges működési mechanizmusai, a) gördülő mechanizmus, b) feltöltési mechanizmus, c) polírozó mechanizmus, d) védőréteg képző mechanizmus [94] 44
29. ábra: A többrétegű fullerén-típusú nanorészecskék három fő súrlódási mechanizmusa: a) csúszás, b) gördülés, c) lehámlás [75] 44
30. ábra: A cirkónium(IV)-oxid hőmérséklet hatására történő fázisátalakulásai, légköri nyomáson ([96], szerzői módosítással) 45
31. ábra: A réz(II)-oxid, CuO: a) egységcella, b) CuO rácsszerkezet ([110], szerzői módosítással) 48
32. ábra: Az ittrium-oxid kerámia térközepes köbös kristályszerkezete [130] 52
33. ábra: Transmissziós elektronmikroszkópos (TEM) felvétel a lemez formájú nanométerű ittria szemcsékről [135] 54
34. ábra: Molekuláris dinamikai szimulációs eredmények nanométerű TiO_2 szemcsékkel adalékolt bázisolaj tribológiai tulajdonságaira ([40], szerzői módosítással) 55
35. ábra: ISO 19291:2016 szabványban ismertetett vizsgálati próbatestek ([65], szerzői módosítással) 59
36. ábra: ISO 19291:2016 szabványban ismertetett vizsgáló berendezés sematikus ábrája ([65], szerzői módosítással) 60
37. ábra: ISO 19291:2016 szabvány alapján elvégzett vizsgálatok súrlódás-eredményei Castrol 5W-30 típusú szériaolajjal 62
38. ábra: ISO 19291:2016 szabvány alapján elvégzett vizsgálatok kopás-eredményei Castrol 5W-30 típusú szériaolajjal 63
39. ábra: ISO 19291:2016 szabvány alapján elvégzett vizsgálatok során, a tárcsa próbatesten keletkezett kopás elemzése digitális mikroszkóppal 64
40. ábra: Castrol 5W-30 szériaolajjal elvégzett, 100°C-os és 120°C-os súrlódási eredményei66
41. ábra: Castrol 5W-30 szériaolajjal 100°C és 120°C-os hőmérsékletekkel elvégzett tribológiai vizsgálatok kopásképe, 200x-os nagyítás 66
42. ábra: Castrol 5W-30 szériaolajjal 100°C-on és 0,3ml olajmennyiséggel elvégzett terhelésvariációs súrlódásmérési vizsgálatainak eredményei 67
43. ábra: Castrol 5W-30 szériaolajjal 100°C-on, 0,3 ml olajmennyiséggel 4 terhelési szinten elvégzett vizsgálatok digitális mikroszkópos kopásképei, 200x-os nagyítással 68

44. ábra: Az ASTM D4172-20-as szabványa alapján elvégezhető, kenőolaj terhelhetőségi vizsgálatok sematikus ábrája (bal, [139]), illetve a számításokhoz használt sematikus ábra (jobb) 69
45. ábra: A számításokhoz használt hasonlósági törvény 69
46. ábra: A szabályos háromszög súlypont hosszának meghatározása szögfüggvények alapján 70
47. ábra: Castrol 5W-30 szériaolajjal 150 N erővel és 0,3 ml olajmennyiséggel különböző hőmérsékleteken elvégzett súrlódásmérési vizsgálatok eredményei 71
48. ábra: Castrol 5W-30 szériaolajjal 150 N-on, különböző hőmérsékleteken elvégzett vizsgálatok digitális mikroszkópos kopásképei, 200x-os nagyítással 72
49. ábra: Castrol 5W-30 szériaolajjal 100°C-on és 0,3 ml olajmennyiséggel elvégzett időtartam-variációs vizsgálatok kopáseredményei 73
50. ábra: Az Optimol SRV®5 tribométerhez megvásárolt folyamatos keringtetésű olajrendszer összeállított képe 74
51. ábra: Castrol 5W-30 szériaolajjal 150 N-on és 100°C-os hőmérsékleten elvégzett kenési rendszer variációs súrlódásmérési vizsgálatainak eredményei 76
52. ábra: Kopásképek, Castrol 5W-30 szériaolaj 150 N, 100°C, 0,3ml és 225ml/h kenési rendszer, 200x-os nagyítás 77
53. ábra: Shell 0W-30 szériaolajjal 150 N-on és 100°C-os hőmérsékleten elvégzett kenési rendszer variációs súrlódásmérési vizsgálatainak eredményei 78
54. ábra: Kopásképek, Shell 0W-30 szériaolaj 150 N, 100°C, 0,3ml és 225ml/h kenési rendszer, 200x-os nagyítás 78
55. ábra: Shell 0W-30 szériaolajjal 100°C-on és 225ml/h olajmennyiséggel elvégzett terhelésvariációs súrlódásmérési vizsgálatok eredményei 79
56. ábra: A referenciának használt Group III típusú, 4 cSt kinematikai viszkozitású bázisolaj tribológiai vizsgálatainak eredményei 100 N-os terhelésen 87
57. ábra: A referenciának használt Group III típusú, 4 cSt kinematikai viszkozitású bázisolajjal elvégzett vizsgálatok során a próbatesteken keletkezett kopások 100x-os nagyítással készített digitális mikroszkópos felvételei 88
58. ábra: A referenciának használt Group III típusú, 4 cSt kinematikai viszkozitású bázisolajjal végzett vizsgálatok során a tárcsa próbatesten keletkezett kopás elemzése konfokális mikroszkóppal, 100x-os nagyítással, a mért kopástérfogati eredménnyel 88
59. ábra: A referenciának használt Group III típusú, 4 cSt kinematikai viszkozitású bázisolajjal elvégzett vizsgálatok során a tárcsa próbatesteken keletkezett kopásról készített 1000x-es nagyítású pásztázó elektronmikroszkópos felvétel 89
60. ábra: A referenciának használt 1 tömegszázalék TX100 diszpergenssel adalékolt Group III típusú, 4 cSt kinematikai viszkozitású bázisolaj tribológiai vizsgálatainak eredményei 91
61. ábra: A referenciának használt 1 tömegszázalék triton (TX100) diszpergenssel adalékolt Group III típusú, 4 cSt kinematikai viszkozitású bázisolajjal elvégzett vizsgálatok során a

próbatesteken keletkezett kopások 100x-os nagyítással készített digitális mikroszkópos felvételei 92
62. ábra: A referenciának használt Group III + 1% TX100 típusú olajmintával végzett vizsgálatok során a tárcsa próbatesten keletkezett kopás elemzése konfokális mikroszkóppal, 100x-os nagyítással, a mért kopástérfogati eredménnyel 92
63. ábra: A referenciának használt 1 tömegszázalék triton (TX100) diszpergenssel adalékolt Group III típusú, 4 cSt kinematikai viszkozitású bázisolajjal elvégzett vizsgálatok során a tárcsa próbatesteken keletkezett kopásról készített 1000x-es nagyítású pásztázó elektronmikroszkópos felvétel 93
64. ábra: Cirkónium(IV)-oxid nanoméretű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményei, különböző nanorészecske-koncentrációk súrlódási együtthatóinak összehasonlítása 95
65. ábra: Cirkónium(IV)-oxid nanoméretű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményei, különböző nanorészecske-koncentrációk okozta kopásátmérők összehasonlítása 96
66. ábra: 0,4 tömegszázalékos cirkónium(IV)-oxid szemcsével adalékolt olajminta okozta kopásképek a golyó és tárcsa próbatesteken, digitális mikroszkópos felvétel, 100x-os nagyítással 96
67. ábra: Cirkónium(IV)-oxid nanoméretű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményei, különböző nanorészecske-koncentrációk okozta kopástérfogatok összehasonlítása 97
68. ábra: Cirkónium(IV)-oxid nanoméretű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményei, tárcsa kopásnyom keresztmetszeti felvételeinek összehasonlítása 98
69. ábra: 0,4 tömegszázalékos nanoméretű cirkóniával adalékolt kenőolajminta tárcsa próbatesten okozta kopásképe elektronmikroszkópos elemzésének eredménye 1000x-es nagyítással, A) löket közép, B) holtpont 99
70. ábra: Cirkónia agglomeráció a 0,4 tömegszázalékos ZrO_2 olajmintával vizsgált tárcsa próbatest kopásfelületén 100
71. ábra: Cirkónium területi eloszlása a 0,4 tömegszázalékos ZrO_2 olajmintával vizsgált tárcsa próbatest kopásfelületén 101
72. ábra: Cirkónium(IV)-oxid nanoméretű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményeinek összehasonlítása, triton diszpergens szükségességének vizsgálata 102
73. ábra: Réz(II)-oxid nanoméretű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményei, különböző koncentrációk súrlódási együtthatóinak összehasonlítása 103
74. ábra: Réz(II)-oxid nanoméretű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményei, különböző nanorészecske-koncentrációk okozta kopásátmérők összehasonlítása 104
75. ábra: 0,5 tömegszázalékos réz(II)-oxid szemcsével adalékolt olajminta okozta kopásképek a golyó és tárcsa próbatesteken, digitális mikroszkópos felvétel, 100x-os nagyítással 104
76. ábra: Réz(II)-oxid nanoméretű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményei, különböző nanorészecske-koncentrációk okozta kopástérfogatok összehasonlítása 105

77. ábra: Réz(II)-oxid nanoméretű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményei, tárcsa kopásnyom keresztmetszeti felvételeinek összehasonlítása 106
78. ábra: 0,5 tömegszázalékos nanoméretű réz-oxiddal adalékolt kenőolajminta tárcsa próbatesten okozta kopásképe elektronmikroszkópos elemzésének eredménye 1000x-es nagyítással 107
79. ábra: 0,5 tömegszázalékos nanoméretű réz-oxiddal adalékolt kenőolajminta tárcsa próbatesten kopásképéből merőleges irányban kimunkált lamella elemzése, réz- és oxigén-tartalom eloszlásának vizsgálata 108
80. ábra: 0,5 tömegszázalékos nanoméretű réz-oxiddal adalékolt kenőolajminta tárcsa próbatesten kopásképéből merőleges irányban ionsugárral kimunkált metszet elemzése, réz- és oxigén-tartalom eloszlásának vizsgálata 109
81. ábra: 0,5 tömegszázalékos nanoméretű réz-oxiddal adalékolt kenőolajminta tárcsa próbatesten elvégzett XPS analízis eredménye, balra az összehasonlító spektrum, jobbra az LMM Auger spektrum 110
82. ábra: Réz(II)-oxid nanoméretű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményeinek összehasonlítása, triton diszpergens szükségességének vizsgálata 115
83. ábra: Ittria nanoméretű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményeinek összehasonlítása, triton diszpergens szükségességének vizsgálata 117
84. ábra: Ittria nanoméretű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményei, különböző koncentrációk súrlódási együtthatóinak összehasonlítása 117
85. ábra: Ittria nanoméretű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményei, különböző nanorészecske-koncentrációk okozta kopásátmérők összehasonlítása 118
86. ábra: 0,5 tömegszázalékos ittria szemcsével adalékolt olajminta okozta kopásképek a golyó és tárcsa próbatesteken, digitális mikroszkópos felvétel, 100x-os nagyítással 118
87. ábra: Ittria nanoméretű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményei, különböző nanorészecske-koncentrációk okozta kopástérfogatok összehasonlítása 119
88. ábra: Ittria nanoméretű kerámia szemcsék tribológiai vizsgálatának eredményei, tárcsa kopásnyom keresztmetszeti felvételeinek összehasonlítása 120
89. ábra: 0,5 tömegszázalékos nanoméretű ittria szemcsékkel adalékolt kenőolajminta tárcsa próbatesten okozta kopásképe elektronmikroszkópos elemzésének eredménye 1000x-es nagyítással, A) löketközép, B) holtpont 121
90. ábra: 0,5 tömegszázalékos nanoméretű ittria szemcsékkel adalékolt kenőolajminta tárcsa próbatest kopásképen elektronmikroszkóp segítségével megfigyelt ittrium-dúsulás a felületi árkokban 123
91. ábra: 0,5 tömegszázalékos nanoméretű ittria szemcsékkel adalékolt kenőolajminta tárcsa próbatest kopásképen elektronmikroszkóp segítségével, 65.000x-es nagyításon megfigyelt ittrium-dúsulás a felületi árkokban 124
92. ábra: 0,5 tömegszázalékos nanoméretű ittria szemcsékkel adalékolt kenőolajminta tárcsa próbatest kopásképen elektronmikroszkóp segítségével, 20.000x-es nagyításon megfigyelt képlékeny alakváltozási területek 125

Táblázatok jegyzéke

1. táblázat: Bázisolajok API-szerinti csoportosítása és csoportosítási határértékek [23]..... 18
2. táblázat: Nanorészecskékkel adalékolt olajminták teljesítményre vonatkozó optimális koncentrációja ([45], szerzői módosítással) 42
3. táblázat: Vizsgálati golyó próbatest előírása ISO 19291:2016 alapján ([65], szerzői módosítással) 60
4. táblázat: Vizsgálati tárcsa próbatest előírása ISO 19291:2016 alapján ([65], szerzői módosítással) 60
5. táblázat: A vizsgálati módszer fejlesztés során alkalmazott beállítási paraméterek táblázata 65
6. táblázat: 100Cr6 jelzésű golyó és tárcsa próbatestek anyagminőségének szabványos anyagösszetétele [150] 84
7. táblázat: Nanomretű kerámia szemcsékkel erősített olajminták tribológiai vizsgálatához használt tribométeres vizsgálati paraméterek 85
8. táblázat: Összefoglaló táblázat az elvégzett vizsgálatokról 86
9. táblázat: A referenciának használt Group III típusú, 4 cSt kinematikai viszkozitású bázisolajjal elvégzett vizsgálatok során a tárcsa próbatesten keletkezett kopásról készült EDX elemanalízis eredménye 90
10. táblázat: A referenciának használt 1 tömegszázaléknyi triton (TX100) diszpergenssel adalékolt Group III típusú, 4 cSt kinematikai viszkozitású bázisolajjal elvégzett vizsgálatok során a tárcsa próbatesten keletkezett kopásról készült EDX elemanalízis 94
11. táblázat: Cirkónium(IV)-oxid kerámiával adalékolt olajmintával végzett vizsgálatok során a tárcsa próbatesten keletkezett kopás felületének elem eloszlása 100
12. táblázat: Réz(II)-oxid kerámiával adalékolt olajmintával végzett vizsgálatok során a tárcsa próbatesten keletkezett kopás felületének elem eloszlása 107
13. táblázat: A Gibbs-féle szabadentalpia meghatározásához szükséges adatok ([160], szerzői módosítással) 113
14. táblázat: Ittria kerámiával adalékolt olajmintával végzett vizsgálatok során a tárcsa próbatesten keletkezett kopás felületének elem eloszlása 122
15. táblázat: Ittria kerámiával adalékolt olajmintával végzett vizsgálatok során a tárcsa próbatest felületi árkok belsejének pontszerű EDX elemzése 124

Rövidítések és szimbólumok jegyzéke

°C	–	Celsius-fok - hőmérséklet mértékegység
µm	–	mikrométer
a, b	–	4-golyós vizsgálat terhelés átszámításához használt geometriai háromszög két befogójának hossza
Al_2O_3	–	alumínium-oxid, alumínia
API	–	American Petroleum Institute
ASTM	–	American Society for Testing and Materials – Amerikai Vizsgálati és Anyagtechnológiai Egyesület
AW	–	kopásgátló adalék - antiwear
B	–	bizmut
BEV	–	elektromos jármű - battery electric vehicle
C	–	szén
Ce	–	cérium
cm	–	centiméter
CO	–	szén-monoxid
CO	–	kobalt
CO_2	–	szén-dioxid
COF	–	súrlódási együttható - coefficient of friction
Cr	–	króm
Cu	–	réz
CuO	–	réz(II)-oxid
D	–	átmérő
DIN	–	Deutsches Institut für Normung – Német Szabványozási Intézet
DLS	–	dinamikus fényszórás – dynamic light scattering
EDX	–	energia-diszperzív röntgen spektroszkópia – energy dispersive X-ray spectroscopy
EP	–	magas nyomásnak ellenálló adalék - Extreme Pressure
F	–	fluor
F_1	–	4-golyós vizsgálat során egy golyópár között fellépő terhelés
Fe	–	vas
FIB	–	fokuszált ionsugaras eljárás - focused ion beam
F_N	–	normális irányú erő
F_S	–	súrlódási erő
FTIR	–	Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia - Fourier-transform infrared spectroscopy
g	–	gramm, tömeg mértékegység
GPa	–	giga-Pascal
GW	–	giga-Watt

h	–	olajfilm réteg vastagság
H	–	Annak az alapulvett kenőolajnak a 37,78°C-ra vonatkozó viszkozitása, melynek 98,89°C-on mért viszkozitása egyenlő a vizsgált kenőolaj viszkozitásával és viszkozitási indexe 100
H	–	hidrogén
h	–	óra
HC	–	elégetlen szénhidrogén
HRC	–	Rockwell keménység
HV	–	Vickers keménység
Hz	–	Hertz - frekvencia mértékegység
ICE	–	belsőégésű motor - internal combustion engine
IL	–	ionos folyadék - ionic liquid
ISO	–	International Standard Organisation - Nemzetközi Szabványügyi Intézet
K	–	Kelvin, hőmérséklet mértékegység
kHz	–	kilo-Hertz
L	–	A vizsgált kenőolaj kinematikai viszkozitása mm2/s-ben 37,78°C (100°F) hőmérsékleten
La	–	lantén
LCA	–	életciklus elemzés - Life Cicle Assessment
LED	–	világító dióda - Light-Emitting Diode
Ltd.	–	Limited
m	–	méter, hossz mértékegység
Mag	–	nagyítás - magnitude
MD	–	molekuláris dinamika - molecular dynamics
mm	–	milliméter
Mo	–	molibdén
MoDTC	–	molibdén-ditiokarbamát
MPa	–	mega-Pascal
N	–	Newton - erő mértékegység
Ni	–	nikkel
nm	–	nanométer
NO_x	–	nitrogén-oxidok csoportja
NP	–	nanorészecske – nanoparticle
O	–	oxigén
Pa	–	Pascal, nyomás mértékegység
PAG	–	polyalkylene glycol, Group V típusú bázisolaj
PAO	–	poli-alfa-olefin típusú Group IV bázisolaj
Pb	–	ólom
PFIB	–	plazma-koncentrált ionsugár eljárás - plasma focused ion beam
PHEV	–	plug-in hibrid elektromos jármű
pl	–	például
ppm	–	az egész egy milliomod része - parts per million
PTFE	–	politetrafluoretilén, teflon
R	–	arányszám, kenőolajminta homogenizáláshoz, olaj részaránya osztva az adalék részarányával

R	–	sugár
R_a	–	átlagos felületi érdesség
RNT	–	radionuklid technológiás online kopásmérés
R_{PK}	–	redukált csúcsmagasság
R_{qA}, R_{qB}	–	érintkező felületelemek felületi érdessége
R_{VK}	–	redukált völgymélység
R_z	–	egyenetlenség magasság
s	–	4-golyós vizsgálat terhelés átszámításához használt geometriai háromszög súlyvonalának hossza
s	–	másodperc
S	–	kén
S	–	folyadék rétegek közötti sebességkülönbség
SAE	–	Járműipari Mérnökök Egyesülete - Society of Automotive Engineers
SEM	–	pásztázó elektronmikroszkóp - scanning electron microscope
Si	–	szilícium
SRV®	–	Rezgés-súrlódás-kopásmérő tribométer - Schwing-Reib Verschleiß Tribometer
TEM	–	transmissziós elektronmikroszkóp – transmission electron microscope
TiO_2	–	titán-dioxid
TX100	–	X100-as triton, diszpergens kenőolaj adalék
U	–	Annak az alapulvett kenőolajnak a 37,78°C-ra vonatkozó viszkozitása, melynek 98,89°C -on (210°F) mért viszkozitása egyenlő a vizsgált kenőolaj viszkozitásával és viszkozitási indexe 0
V	–	vanádium
VI	–	viszkozitás index
W	–	wolfram
WSD	–	kopáskép átmérő - wear scar diameter
XPS	–	röntgen-fotoelektron spektroszkópia – X-ray photoelectron spectroscopy
Y	–	ittrium
Y_2O_3	–	ittrium(III)-oxid, ittria
ZDDP	–	cink-dialkil-dithiofoszfát
Zn	–	cink
Zr	–	cirkónium
ZrO_2	–	cirkónium(IV)-oxid, cirkónia
η	–	kinematikai viszkozitás jele
Λ	–	olajréteg paraméter
μ	–	súrlódási együttható
ν	–	dinamikai viszkozitás jele
ρ	–	sűrűség jele
τ	–	nyíró feszültség jele

Irodalomjegyzék

[1] W. Wang, G. Xie and J. Luo, “Black phosphorus as a new lubricant,” *Friction,* vol. 6., pp. 116-142, 2018.

[2] B. Hanula and P. Németh, “Fenntartható fenntarthatóság,” *Magyar Tudomány,* vol. 182, no. 3, pp. 353-363., 2021.

[3] M. Timmer, E. Dietzenbacher, B. Los, R. Stehrer and G. de Vries, “An Illustrated User Guide to the World Input-Output Database: the Case of Global Automotive Production,” *Review of International Economics,* vol. 23, no. 3, pp. 575-605., 2015.

[4] F. Hein, F. Peter und P. Graichen, „Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2019,“ *Agora Energiewende,* pp. 1-74., Januar 2020.

[5] L. Yang, B. Yu, B. Yang, H. Chen, G. Malima and Y. Wei, "Life cycle environmental assessment of electric and internal combustion engine vehicles in China," *Journal of Cleaner Production,* vol. 285., no. 124899., pp. 1-13., 2021.

[6] K. Petrauskienė, M. Skvarnavičiūtė and J. Dvarionienė, "Comparative environmental life cycle assessment of electric and conventional vehicles in Lithuania," *Journal of Cleaner Production,* vol. 246., no. 119042., pp. 1-12., 2020.

[7] T. Peng, X. Ou and X. Yan, "Development and application of an electric vehicles life-cycle energy consumption and greenhouse gas emissions analysis model," *Chemical Engineering Research and Design,* vol. 131., pp. 699-708., 2018.

[8] D. Wang, N. Zamel, K. Jiao, Y. Zhou, S. Yu, Q. Du and Y. Yin, "Life cycle analysis of internal combustion engine, electric and fuel cell vehicles for China," *Energy,* vol. 59., pp. 402-412., 2013.

[9] Z. Wu, M. Wang, J. Zheng, X. Sun, M. Zhao and X. Wang, "Life cycle greenhouse gas emission reduction potential of battery electric vehicle," *Journal of Cleaner Production,* vol. 190., pp. 462-470., 2018.

[10] P. Girardi, A. Gargiulo and P. C. Brambilla, "A comparative LCA of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle using the appropriate power mix: the Italian case study," *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 20., pp. 1127-1142., 2015.

[11] T. R. Hawkins, B. Singh, G. Majeau-Bettez and A. H. Strømman, "Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles," *Journal of Industrial Ecology,* vol. 17., no. 1., pp. 53-64., 2012.

[12] N. C. Onat, M. Kucukvar and O. Tatari, "Conventional, hybrid, plug-in hybrid or electric vehicles? State-based comparative carbon and energy footprint analysis in the United States," *Applied Energy,* vol. 150., pp. 36-49., 2015.

[13] A. Nordelöf, M. Messagie, A. Tillman, M. L. Söderman and J. Van Mierlo,

"Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles—what can we learn from life cycle assessment?," *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 19., pp. 1866-1890., 2014.

[14] D. Burchart-Korol, S. Jursova, P. Folega, J. Korol, P. Pustejovska and A. Blaut, "Environmental life cycle assessment of electric vehicles in Poland and the Czech Republic," *Journal of Cleaner Production,* vol. 202., pp. 476-487., 2018.

[15] F. Del Pero, M. Delogu and M. Pierini, "Life Cycle Assessment in the automotive sector: a comparative case study of Internal Combustion Engine (ICE) and electric car," *Structural Integrity Procedia,* vol. 12., pp. 521-537., 2018.

[16] C. Tagliaferri, S. Evangelisti, F. Acconcia, T. Domenech, P. Ekins, D. Barletta and P. Lettieri, "Life cycle assessment of future electric and hybrid vehicles: A cradle-to-grave systems engineering approach," *Chemical Engineering Research and Design,* vol. 112., pp. 298-309., 2016.

[17] Y. Bicer and I. Dincer, "Life cycle environmental impact assessments and comparisons of alternative fuels for clean vehicles," *Resources, Conservation & Recycling,* vol. 132., pp. 141-157., 2018.

[18] Q. Qiao, F. Zhao, Z. Liu, X. He and H. Hao, "Life cycle greenhouse gas emissions of Electric Vehicles in China: Combining the vehicle cycle and fuel cycle," *Energy,* vol. 177., pp. 222-233., 2019.

[19] C. Bauer, J. Hofer, H. Althaus, A. Del Duce and A. Simons, "The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework," *Applied Energy,* vol. 157., pp. 871-883., 2015.

[20] S. Wappelhorst, “The end of the road? An overview of combustion-engine car phase-out announcements across Europe,” International Council on Clean Transportation, Berlin, 2020.

[21] R. Kuti, “On-site Disaster Response for Damage Caused by Extreme Weather Phenomena,” in *Effects of global climate change and improvement of adaptation especially in the public service area*, Budapest, Dialóg Campus, 2019, pp. 123-144..

[22] H. Leonhardt, K. Reders, E. Froböse, H. Müller, V. Null, J. Miller und P. Busse, Motorenöl - Lexikon, Hamburg: Shell Global Solutions (Deutschland).

[23] T. Mang és W. Dresel, Lubricants and Lubrication, Weinheim, DE.: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2007.

[24] M. Torbacke, A. Kassman Rudolphi és E. Kassfeldt, Lubricants, Chichester, UK.: John Wiley & Sons Ltd, 2014.

[25] H. Czichos und K. Habig, Tribologie-Handbuch, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2010.

[26] C. Taylor, „Piston Assemblies; Background and Lubrication Analysis,” in *Engine Tribology,* London, Elsevier, 1993, pp. 213-240..

[27] A. Szirmai, A. Tóth, I. Radics és I. Valasek, Kőolaj-termékek kézikönyve III. Motor- és hajtóműolajok, Budapest: ÁFOR - Ásványolajforgalmi vállalat, 1980.

[28] ISO 23581:2020, *Petroleum products and related products - Determination of kinematic viscosity - Method by Stabinger type viscometer,* International Organization for Standardization, 2020.

[29] S. Amiril, E. Rahim and S. Syahrullail, "A review on ionic liquids as sustainable lubricants in manufacturing and engineering: Recent research, performance, and applications," *Journal of Cleaner Production,* vol. 168, pp. 1571-1589, 2017.

[30] M. Ratoi, R. Castle, C. Bovington and H. Spikes, "The Influence of Soot and Dispersant on ZDDP Film Thickness and Friction," *Lubrication Science,* vol. 17, no. 1, pp. 25-43, 2004.

[31] Á. Tóth és J. Knaup, „Különböző kenőolaj adalékok tribológiai tulajdonságainak vizsgálata," in *Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT)*, Kolozsvár, 2019.

[32] Á. Tóth, "Különböző súrlódáscsökkentő kenőolajadalékok tribológiai hatásainak vizsgálata," *Műszaki Katonai Közlöny,* vol. 29., no. 1., pp. 43-56., 2019.

[33] D. Troyer, "A Balanced Approach to Lubrication Effectiveness," ESCO Products Inc., Tulsa, 2010.

[34] S. Srivastava, Developments in Lubricant Technology, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2014.

[35] D. Csepreghy, Á. Tóth and J. Knaup, "Ultra-alacsony viszkozitású kenőolajak tribológiai tulajdonságainak vizsgálata," in *Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT)*, Kolozsvár, 2019.

[36] Y. Misaki, K. Yamamori, Y. Uematsu, K. Manabe, I. Miyata and S. Kusuhara, "Development of Ultra Low Viscosity 0W-8 Engine Oil," *SAE Technical Paper,* Vols. 2020-01-1425, p. 7, 2020.

[37] M. Anand, M. Hadfield, J. Viesca, B. Thomas, A. Battez and S. Austen, "Ionic liquids as tribological performance improving additive for in-service and used fully-formulated diesel engine lubricants," *Wear,* Vols. 334-335, pp. 67-74, 2015.

[38] A. Singh, C. Prashant and T. Mamatha, "A review on tribological performance of lubricants with nanoparticles additives," *Materials Today: Proceedings,* vol. 25, no. 4, pp. 586-591, 2020.

[39] I. Uflyand, V. Zhinzhilo and V. Burkalova, "Metal-containing nanomaterials as lubricant additives: State-of-the-art and future development," *Friction,* vol. 7, no. 2, pp. 93-116, 2019.

[40] L. Peña-Parás, H. Gao, D. Maldonado-Cortés, A. Vellore, P. García-Pineda, O. Montemayor, K. Nava and A. Martini, "Effects of substrate surface roughness and nano/micro particle additive size on friction and wear in lubricated sliding," *Tribology*

International, vol. 119., pp. 88-98., 2018.

[41] B. Vengudusamy, J. Green, G. Lamb and H. Spikes, “Behaviour of MoDTC in DLC/DLC and DLC/steel contacts,” *Tribology International,* vol. 54, pp. 68-76, 2012.

[42] M. De Feo, M. De Barros Bouchet, C. Minfray, T. Le Mogne, F. Meunier, L. Yang, B. Thiebaut and J. Martin, “MoDTC lubrication of DLC-involving contacts. Impact of MoDTC degradation,” *Wear,* Vols. 348-349, pp. 116-125, 2016.

[43] Y. Yohida and S. Kunitsugu, “Friction wear characteristics of diamond-like carbon coatings in oil containing molybdenum dialkyldithiocarbamate additive,” *Wear,* Vols. 414-415, pp. 118-125, 2018.

[44] Y. Al-Jeboori, S. Kosarieh, A. Morina and A. Neville, “Investigation of oure sliding and sliding/rolling contacts in a DLC/Cast iron system when lubricated in oils containing MoDTC-Type friction modifier,” *Tribology International,* vol. 122, pp. 23-37, 2018.

[45] M. Dubey, J. Bijwe and S. Ramakumar, “PTFE based nano-lubricants,” *Wear,* vol. 306, pp. 80-88, 2013.

[46] Y. Gu, J. Fei, J. Huang, L. Zhang, M. Qu and X. Zheng, “Carbon microspheres coated with graphene oxide nanosheets as oil-based additives for tribological applications,” *Materials Today Communications,* vol. 25, pp. 1-10, 2020.

[47] J. Lee, S. Cho and Y. Hwang, “Application of fullerene-added nano-oil for lubrication enhancement in friction surfaces,” *Tribology International,* vol. 42, pp. 440-447, 2009.

[48] J. Zhou, Z. Wu, Z. Zhang, W. Liu and Q. Xue, “Tribological behavior and lubricating mechanism of Cu nanoparticles in oil,” *Tribology Letters,* vol. 8, pp. 213-218, 2000.

[49] Y. Choi, C. Lee, M. Park, J. Lee, C. Choi and M. Jung, “Tribological behavior of copper nanoparticles as additives in oil,” *Current Applied Physics,* vol. 9, pp. e124-e127, 2009.

[50] N. Mohan, S. Mayank, R. Singh and N. Kumar, “Tribological Properties of Automotive Lubricant SAE 20W-40 Containing Nano-Al_2O_3 particles,” in *SAE International,* United States, 2014.

[51] A. Battez, R. González, J. Viesca, J. Fernández, J. Díaz Fernández, A. Machado, R. Chou and J. Riba, "CuO, ZrO_2 and ZnO nanoparticles as antiwear additive in oil lubricants," *Wear,* vol. 265., pp. 422-428., 2008.

[52] L. Peña-Parás, L. Taha-Tijerina, A. García, D. Maldonado, A. Nájera, P. Cantú and D. Ortiz, "Thermal transport and tribological properties of nanogreases for metal-mechanic applications," *Wear,* Vols. 232-233., pp. 1322-1326., 2015.

[53] Fisher Scientific GSA , “Fisherbrand™ Model 120 Sonic Dismembrator,” Fisher Scientific GSA , 2021. [Online]. Available: https://www.fishersci.com/shop/products/fisher-scientific-model-120-sonic-dismembrator-4/p-3974654. [Accessed 06. 07. 2021.].

[54] witeg Labortechnik GmbH, “Magnetic stirrer,” witeg Labortechnik GmbH, 2021. [Online]. Available: https://www.witeg.de/daten/documents/MS20D%20EN.pdf. [Accessed 06. 07. 2021.].

[55] Anton Paar GmbH., „Kinematikus viszkoziméter: SBM,” Anton Paar, 2021. [Online]. Available: https://www.anton-paar.com/hu-hu/termekek/reszletek/svm-series/. [Hozzáférés dátuma: 05 01 2021].

[56] F. Babick, “Dynamic light scattering (DLS),” in *Characterization of Nanoparticles*, Amsterdam, Elsevier, 2020, pp. 137-172.

[57] T. Mang, Encyclopedia of Lubricants and Lubrication, Berlin: Springer, 2014.

[58] S. Akl, A. Abdel-Rehim and S. Elsoudy, "An Experimental Investigation of Tribological Performance of a Lubricant Using Different Nano Additives," *SAE Technical Paper,* no. 2018-01-0833, 2018.

[59] M. Ali and X. Hou, "Improving the tribological behavior of internal combustion engines via the addition of nanoparticles to engine oils," *Nanotechnology Reviews,* vol. 4., no. 4., pp. 347-358., 2015.

[60] H. Wu, J. Zhao, X. Cheng, W. Xia, A. He, J.-H. Yun, S. Huang, L. Wang, H. Huang, S. Jiao and Z. Jiang, "Friction and wear characteristics of TiO_2 nano-additive water-based lubricant on ferritic stainless steel," *Tribology International,* vol. 117., pp. 24-38., 2018.

[61] S. Ingole, A. Charanpahari, A. Kakade, S. Umare, D. Bhatt and J. Menghani, "Tribological behavior of nano TiO_2 as an additive in base oil," *Wear,* vol. 301., pp. 776-785., 2013.

[62] H. Wu, J. Zhao, W. Xia, X. Cheng and A. He, "A study of the tribological behaviour of TiO_2 nanoadditive water-based lubricants," *Tribology International,* vol. 109., pp. 398-408., 2017.

[63] J. Ma and M. Bai, "Effect of ZrO_2 Nanoparticles Additive on the Tribological Behavior of Multialkylated Cyclopentanes," *Tribology Letters,* vol. 36., pp. 191-198., 2009.

[64] B. Zabala, A. Igartua, X. Fernández, C. Priestner, H. Ofner, O. Knaus, M. Abramczuk, P. Tribotte, F. Girot, E. Roman and R. Nevshupa, “Friction and wear of a piston ring/cylinder liner at the top dead centre: Experimental study and modelling,” *Tribology International,* vol. 106, pp. 23-33, 2017.

[65] ISO 19291:2016, *Lubricants - Determination of tribological quantities for oils and greases - Tribological test in the translatory oscillation apparatus,* Vernier, Genova: International Organization for Standardization, 2016.

[66] Y. Wu, W. Tsui and T. Liu, "Experimental analysis of tribological properties of lubricating oils with nanoparticle additives," *Wear,* vol. 262., pp. 819-825., 2007.

[67] ASTM D5707-19, *Standard Test Method for Measuring Friction and Wear Properties of Lubricating Grease Using a High-Frequency, Linear-Oscillation (SRV) Test Machine,* West Conshohocken: ASTM International, 2019.

[68] R. Leach, „Surface Topography, Measurement, Instrumentation," in *Fundamental Principles of Engineering Nanometrology,* Oxford, William Andrew Publishing, 2014, pp. 133-204.

[69] Z. Tabakov, T. Varga, G. Marton, V. Mustó, L. Paulovics és J. Knaup, „Speciális mérési módszer fejlesztése konfokális mikroszkóppal," in *Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság*, Marosvásárhely, 2018.

[70] M. Scherge, K. Pöhlmann and A. Gervé, "Wear measurement using radionuclide-technique (RNT)," *Wear,* vol. 254, no. 9, pp. 801-817, 2003.

[71] T. Luo, X. Wei, X. Huang, L. Huang and F. Yang, "Tribological properties of Al_2O_3 nanoparticles as lubricating oil additives," *Ceramics International,* vol. 40., pp. 7143-7149., 2014.

[72] M. Utlaut, "Focused ion beams for nano-machining and imaging," in *Nanolithography,* Cambridge, Woodhead Publishing Limited, 2014, pp. 116-157.

[73] A. Battez, J. Viesca, R. González, D. Blanco, E. Asedegbega and A. Osorio, "Friction reduction properties of a CuO nanolubricant used as lubricant for a NiCrBSi coating," *Wear,* vol. 268., pp. 325-328., 2010.

[74] ISO/TS 80004-1:2015, *Nanotechnologies - Vocabulary - Part 1: Core terms,* Vernier, Geneva: International Organization for Standardization, 2015.

[75] W. Dai, Kheireddin B., H. Gao and H. Liang, "Roles of nanoparticles in oil lubrication," *Tribology International,* vol. 102, pp. 88-98, 2016.

[76] L. Zhang, J. Tu, H. Wu and Y. Yang, "WS_2 nanorods prepared by self-transformation process and their tribological properties as additive in base oil," *Materials Science and Engineering,* Vols. 454-455, pp. 487-491, 2007.

[77] B. Gullac and O. Akalin, "Frictional characteristics of IF-WS_2 nanoparticles in simulated engine conditions," *Tribology Transactions,* vol. 53, pp. 939-947, 2010.

[78] W. Liu and S. Chen, "An investigation of the tribological behavior of surface modified ZnS nanoparticles in liquid paraffin," *Wear,* vol. 238, pp. 120-124, 2000.

[79] J. Zhou, Z. Wu, Z. Zhang, W. Liu and H. Dang, "Study on an antiwear and extreme pressure additive of surface coated LaF_3 nanoparticles in liquid paraffin," *Wear,* vol. 249., pp. 333-337., 2001.

[80] S. Chen and W. Liu, "Oleic acid capped PbS nanoparticles: synthesis, characterization and tribological properties," *Materials Chemistry and Physics,* vol. 98, pp. 183-189, 2006.

[81] H. Yu, Y. Xu, P. Shi, B. Xu, X. Wang, Q. Liu and H. Wang, "Characterization and nano-mechanical properties of tribo films using Cu nanoparticles as additives," *Surface and Coatings Technology,* vol. 203, pp. 28-34, 2008.

[82] R. Chou, A. Battez, J. Cabello, J. Viesca, A. Osorio and A. Sagastume, "Tribological behavior of polyalphaolefin with the addition of nickel nanoparticles," *Tribology International,* vol. 43., pp. 2327-2332., 2010.

[83] C. Chou and S. Lee, “Tribological behavior of nanodiamond-dispersed lubricants on carbon steels and aluminium alloy,” *Wear,* vol. 269, pp. 757-762, 2010.

[84] J. Dong and Z. Hu, “A study of the anti-wear and friction-reducing properties of the lubricant additive, nanometer zinc borate,” *Tribology International,* vol. 31, pp. 219-223, 1998.

[85] W. Ye, T. Cheng, Q. Ye, X. Guo, Z. Zhang and H. Dang, "Preparation and tribological properties of tetrafluorobenzoic acidmodified TiO_2 nanoparticles as lubricant additives," *Materials Science and Engineering,* vol. A359., pp. 82-85., 2003.

[86] J. Viesca, A. Battez, R. González, R. Chou and J. Cabello, "Antiwear properties of carbon-coated copper nanoparticles used as an additive to a polyalphaolefin," *Tribology International,* vol. 44., pp. 829-833., 2011.

[87] S. Qui, Z. Zhou, J. Dong and G. Chen, "Preparation of Ni Nanoparticles and Evaluation of Their Tribological Performance as Potential Additives in Oils," *Journal of Tribology,* vol. 123., pp. 441-443., 2001.

[88] C. Koshy, P. Rajendrakumar and M. Thottackkad, “Evaluation of the tribological and thermo-physical properties of coconut oil added with MoS_2 nanoparticles at elevated temperatures,” *Wear,* Vols. 330-331, pp. 288-308, 2015.

[89] J. Padgurskas, R. Rukuiza, I. Prosycevas and R. Kreuvaitis, “Tribological properties of lubricant additives of Fe, Cu and Co nanoparticles,” *Tribology International,* vol. 60, pp. 224-232, 2013.

[90] M. Asrul, N. Zulkifli, H. Masjuki and M. Kalam, “Tribological properties and lubricant mechanism of Nanoparticle in Engine Oil,” *Procedia Engineering,* vol. 68, pp. 320-325, 2013.

[91] N. Azman, S. Samion and M. Mat Sot, “Investigation of tribological properties of CuO/palm oil nanolubricant using pin-on-disc tribotester,” *Green Materials,* vol. 6, pp. 30-37, 2018.

[92] Z. J. Zhang, D. Simionesie and C. Schaschke, “Graphite and Hybrid Nanomaterials as Lubricant Additives,” *Lubricants,* vol. 2., pp. 44-65., 2014.

[93] M. Gulzar, H. Masjuki, M. Kalam, M. Varman, N. Zulkifli, R. Mufti and R. Zahid, “Tribologial performance of nanoparticles as lubricating oil additives,” *Journal of Nanoparticle Research,* vol. 18, pp. 223: 1-25, 2016.

[94] W. Shafi, A. Raina and M. Ul Haq, “Friction and wear characteristics of vegetable oils,” *Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces,* vol. 12., pp. 27-43., 2018.

[95] B. Kheireddin, W. Lu, I.-C. Chen and M. Akbulut, “Inorganic nanoparticle-based ionic liquid lubricants,” *Wear,* vol. 303, pp. 185-190, 2013.

[96] J. Khodaii, F. Barazandeh and e. al., “Influence of grinding parameters on phase transformation, surface roughness, and grinding cost of bioceramic partially stabilized zirconia (PSZ) using diamond grinding wheel,” *Journal of Advanced Manufacturing Technology,* vol. 105, no. 9-12, pp. 1-15, 2019.

[97] M. Durat, M. Kapsiz, E. Nart, F. Ficici and A. Parlak, “The effects of coating materials in spark ignition engine design,” *Materials & Design (1980-2015),* vol. 36, pp. 540-545, 2012.

[98] Á. Tóth, K. Schintzel és A. Dudás, „Kerámia erősítésű, atmoszférikus plazmaszórt, korrózióálló hengerfal-bevonatok súrlódási tulajdonságainak vizsgálata,” in *Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT)*, Kolozsvár, 2016.

[99] G. Sakthinathan, "Tribological Characteristics of Yttria Stabilized Zirconia Nanolubricants," *SAE Technical Paper,* no. 2014-01-2790, 2014.

[100] G. Sakthinathan, R. Saravanan and C. Uthirapathy, "Thermal characteristics of yttria stabilized zirconia nanolubricants," *Thermal Science,* vol. 16., no. 2., pp. 481-487., 2012.

[101] S. Ma, S. Zheng, D. Cao and H. Guo, "Anti-wear and friction performance of ZrO_2 nanoparticles as lubricant additive," *Particuology,* vol. 8., pp. 468-472., 2010.

[102] J. Casado, A. González, Á. Huerga, H. Rodríguez-Solla, M. Díaz-García and R. Badía-Laíño, "Unctuous ZrO_2 nanoparticles with improved functional attributes as lubricant additives," *Nanotechnology,* vol. 28., no. 49., 2017.

[103] W. Li, S. Zheng, B. Cao and S. Ma, "Friction and wear properties of ZrO_2/SiO_2 composite nanoparticles," *Journal of Nanoparticle Research,* vol. 13., pp. 2129-2137., 2011.

[104] B. Kerkwijk, M. García, W. van Zyl, L. Winnubst, E. Mulder, D. Schipper and H. Verweij, "Friction behaviour of solid oxide lubricants as second phase in α-Al_2O_3 and stabilised ZrO_2 composites," *Wear,* vol. 256., pp. 182-189., 2004.

[105] I. Piwonski and K. Soliwoda, "The effect of ceramic nanoparticles on tribological properties of alumina sol–gel thin coatings," *Ceramics International,* vol. 36., pp. 47-54., 2010.

[106] Y. He, A. Winnubst, D. Schipper, A. Burggraaf and H. Verweij, "Effects of a second phase on the tribological properties of Al_2O_3 and ZrO_2 ceramics," *Wear,* vol. 210., pp. 178-187., 1997.

[107] A. Tucci and L. Esposito, "Microstructure and tribological properties of ZrO_2 ceramics," *Wear,* vol. 172., pp. 111-119., 1994.

[108] J. Ouyang, Y. Li, Y. Wang, Y. Hou, T. Murakami and S. Sasaki, "Microstructure and tribological properties of $ZrO_2(Y_2O_3)$ matrix composites doped with different solid lubricants from room temperature to 800 °C," *Wear,* vol. 267., pp. 1353-1360., 2009.

[109] S. Rani, "The tribological behavior of TiO_2, CeO_2 and ZrO_2 nanoparticles as a lubricant additive in rice bran oil," *International Journal of Scientific & Engineering Research,* vol. 7., no. 8., pp. 708-712., 2016.

[110] W. Gao, M. Imran, M. Siddiqui, M. Naeem and F. Jamil, “Molecular Description of Copper (I) Oxide and Copper (II) Oxide,” *Química Nova,* vol. 41., no. 8., pp. 874-879., 2018.

[111] B. Polyakov, L. Dorogin, S. Vlassov, M. Antsov, I. Kulis and R. Lohmus, “In situ measurements of ultimate bending strength of CuO and ZnO nanowires,” *The European Physical Journal B,* vol. 85., no. 11., p. 366., 2012.

[112] B. Aktas, “Microstructure, Mechanical and Electrical Properties of CuO Doped 8YSZ,” *High Temperature Materials and Processes,* vol. 32., no. 6., pp. 551-556., 2017.

[113] M. Ali, A. Ariff, C. Jaafar, S. Tahir, N. Mazlan, K. Maori és H. Naser, „Factors Affecting the Porosity and Mechanical Properties of Porous Ceramic Composite Materials,” in *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering,* Amsterdam, Elsevier Inc., 2017, pp. 1-54..

[114] A. Nazari and S. Riahi, “Effects of CuO nanoparticles on compressive strength of self-compacting concrete,” *Sadhana,* vol. 36., no. 3., pp. 371-391., 2011.

[115] N. Liu, J. Sun and D. Wu, “Elastic constants and thermodynamic properties of Cu, Cu_2O and CuO from first-principles calculations,” *Advanced Materials Research,* Vols. 335-336., pp. 328-332., 2011.

[116] H. Kato and K. Komai, "Tribofilm formation and mild wear by tribo-sintering of nanometer-sized oxide particles on rubbing steel surfaces," *Wear,* vol. 262., pp. 36-41., 2007.

[117] Manu V. Thottackkad, P.K. Rajendrakumar and K. Prabhakaran Nair, "Experimental studies on the tribological behaviour of engine oil (SAE15W40) with the addition of CuO nanoparticles," *Industrial Lubrication and Tribology,* vol. 66., no. 2., pp. 289-297., 2014.

[118] S. Alves, B. Barros, M. Trajano, K. Ribeiro and E. Moura, "Tribological behavior of vegetable oil-based lubricants with nanoparticles of oxides in boundary lubrication conditions," *Tribology International,* vol. 65., pp. 28-36., 2013.

[119] S. Poulston, P. Parlett, P. Stone and M. Bowker, "Surface Oxidation and Reduction of CuO and Cu_2O Studied Using XPS and XAES," *Surface and Interface Analysis,* vol. 24., pp. 811-820., 1996.

[120] L. Yuan, Q. Yin, Y. Wang and G. Zhou, "CuO Reduction Induced Formation of CuO/Cu_2O Hybrid Oxides," *Chemical Physics Letters,* vol. 590., pp. 92-96., 2013.

[121] E. Goldstein and R. Mitchell, "Chemical kinetics of copper oxide reduction with carbon monoxide," *Proceedings of the Combustion Institute,* vol. 33., pp. 2803-2810., 2011.

[122] J. Kim, J. Rodriguez, J. Hanson, A. Frenkel and P. Lee, "Reduction of CuO and Cu_2O

with H_2: H Embedding and Kinetic Effects in the Formation of Suboxides," *Journal of the American Chemical Society,* vol. 125., no. 35., pp. 10684-10692., 2003.

[123] X. Wang, J. Hanson, A. Frenkel, J. Kim and J. Rodriguez, “Time-resolved Studies for the Mechanism of Reduction of Copper Oxides with Carbon Monoxide: Complex Behavior of Lattice Oxygen and the Formation of Suboxides,” *Journal of Physical Chemistry B,* vol. 108, pp. 13667-13673, 2004.

[124] K. Okayama and K. Hiratsuka, “Verification of triboreduction of copper oxide in phenolic composite material through visualisation of friction surface,” *Transactions of the JSME (in Japanese),* vol. 84, no. 866, pp. 422-428, 2018.

[125] S. Bhaumik and S. Pathak, "Analysis of Anti-Wear Properties of CuO Nanoparticles as Friction Modifiers in Mineral Oil (460cSt Viscosity) Using Pin-On-Disk Tribometer," *Tribology in Industry,* vol. 37., no. 2., pp. 196-203., 2015.

[126] E. Ettafaghi, H. Ahmadi, A. Rashidi and S. Mohtasebi, "Investigation of the Anti-wear Properties of Nano Additives on Sliding Bearings of Internal Combustion Engines," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing,* vol. 14., no. 5., pp. 805-809., 2013.

[127] S. Alves, V. Mello, E. Faria and A. Camargo, "Nanolubricants developed from tiny CuO nanoparticles," *Tribology International,* vol. 100., pp. 263-271., 2016.

[128] H. Liu, Y. Zhang, S. Zhang, Y. Chen, P. Zhang and Z. Zhang, "Preparation and evaluation of tribological properties of oil-soluble rice-like CuO nanoparticles," *Industrial Lubrication and Tribology,* vol. 67., no. 3., pp. 276-283., 2015.

[129] S. Akl, A. Abdel-Rehim and E. Khafagy, "Tribological Properties of Engine Lubricant with Nano-Copper Oxide as an Additive," *SAE Technical Paper,* 2016.

[130] T. Götsch, W. Wallisch, M. Stöger-Pollach, B. Klötzer and S. Penner, “From zirconia to yttria: Sampling the YSZ phase diagram using sputter-deposited thin films,” *AIP Advances,* vol. 6, pp. 025119-01 - 025119-20., 2016.

[131] B. Kilbourn, “Lanthanide Oxides,” in *Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials,* Elsevier Ltd., 1991, pp. 276-278..

[132] J. Choi, “Plasma Resistance Evaluation and Characteristics of Yttria Ceramics Sintered by Using Calcination Yttria,” in *Ceramic Materials - Synthesis, Characterization, Applications and Recycling,* London, IntechOpen Ltd., 2019, pp. 4. chapter 1-20..

[133] C. Wukusick and J. Collins, “An iron-chromium-aluminium alloy containig yttrium,” *Material Research and Standards,* vol. 4., pp. 637-646., 1964.

[134] R. Liu and D. Y. Li, "Protective effect of yttrium additive in lubricants on corrosive wear," *Wear,* Vols. 225-229., pp. 968-974., 1999.

[135] X. He, H. Xiao, J. Kyle, E. Terrell and H. Liang, "Two-dimensional nanostructured Y_2O_3 particles for viscosity modification," *Applied Physics Letters,* vol. 104., no.

163107., pp. 1-4., 2014.

[136] R. Ramahanesh, S. Baskar, G. Sriram, S. Arumugam and M. Ramachandran, “Finite Element Analysis of a Journal Bearning Lubricated with Nano lubricants,” *FME Transactions,* vol. 48, pp. 476-481., 2020.

[137] Castrol Limited, *Biztonsági adatlap, Castrol EDGE 5W-30 C3,* Magyarország: Castrol Limited, 2021.

[138] Á. Tóth, L. Paulovics, B. Hanula, J. Knaup und A. Kopp, „Methodenentwicklung zur Einstufung von Motorölen anhand tribologischer Eigenschaften,“ in *Gesellschaft für Tribologie e.V. (GfT)*, Jülich, 2017.

[139] ASTM D4172-20, *Standard Test Method for Wear Preventive Characteristics of Lubricating Fluid (Four-Ball Method),* West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.

[140] Carl Roth GmbH + Co KG, *Biztonsági adatlap, Cirkónium(IV)-oxid,* Karlsruhe: Carl Roth GmbH + Co KG, 20107.

[141] Carl Roth GmbH + Co KG, *Biztonsági adatlap, réz(II)-oxid p.a., ACS, drót,* Karlsruhe: Carl Roth GmbH + Co KG, 2017.

[142] Carl Roth GmbH + Co KG, *Biztonsági adatlap, Ittrium(III)-oxid ROTI®METIC,* Karlsruhe: Carl Roth GmbH + Co KG, 2015.

[143] C. Horváth, *Biztonsági adatlap, Group III 4 cSt,* Almásfüzitő: MOL-LUB Kft., 2009.

[144] Sigma-Aldrich Kft., *Biztonsági adatlap, Triton X-100,* Budapest: Sigma-Aldrich Kft., 2019.

[145] M. Sanchez-Dominhuez, C. Aubery and C. Solans, “New Trends on the Synthesis of Inorganic Nanoparticles Using Microemulsions as Confined Reaction Media,” in *Smart Nanotechnology,* Rijeka, InTech, 2012, pp. 196-220..

[146] V. Torres, M. Posa, B. Srdjenovic and A. Simplício, “Solubilization of fullerene C60 in micellar solutions of different solubilizers,” *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces,* vol. 82, no. 1, pp. 46-53., 2011.

[147] Y. Yang, D. Corti és E. Franses, „Effect of Triton X-100 on the stability of titania nanoparticles against agglomeration and sedimentation: A masked depletion interaction,” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects,* %1. kötet516, pp. 296-304., 2017.

[148] S. Mousavi, S. Heris and P. Estellé, “Viscosity, tribological and physicochemical features of ZnO and MoS_2 diesel oil-based nanofluids: An experimental study,” *Fuel,* vol. 293, p. 120481, 2021.

[149] S. Liang, Z. Shen, M. Yi, L. Liu, X. Zhang and S. Ma, “In-situ exfoliated graphene for high-performance water-based lubricants,” *Carbon,* vol. 96., pp. 1181-1190., 2016.

[150] Y. Guo and C. Liu, “Mechanical Properties of Hardened AISI 52100 Steel in Hard

Machining Processes," *Journal of Manufacturing Science and Engineering,* vol. 124, no. 1, p. 19., 2002.

[151] Á. Tóth and J. Knaup, "Investigation of the tribological properties of nano-scaled ZrO_2 and CuO additive in automotive lubricants," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* vol. 903., p. 012015., 2020.

[152] Á. Tóth, Á. Szabó and R. Kuti, "Tribological Properties of Nano-Sized ZrO_2 Ceramic Particles in Automotive Lubricants," *FME Transactions,* vol. 49., no. 1., pp. 36-43., 2021.

[153] Á. Tóth, „ZrO_2 anyagösszetételű nano-méretű kerámia anyag kenőolaj-adalékként való használhatóságának vizsgálata," Universitas-Győr Nonprofit Kft., Győr, 2019.

[154] Á. Tóth, "Investigation of the tribological properties of selected nano-ceramic materials as lubricant additives in automotive engine oils," in *Doktoranduszok Országos Szövegsége (DOSZ),* Budapest, 2019.

[155] Á. Szabó, Á. Tóth és J. Knaup, „Nano-méretű cirkónium-dioxid kerámia kenőolaj adalékként való alkalmazhatóságának vizsgálata," in *Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társasát (EMT)*, Kolozsvár, 2019.

[156] Á. Tóth and T. Fodor, "Nanoméretű réz(II)-oxid kerámiaszemcsékkel erősített kenőolaj tribológiai vizsgálata," *Hadmérnök,* vol. 15., pp. 75-92., 2020.

[157] Á. Tóth, Á. Szabó, J. Rohde-Brandenburger and R. Kuti, "Tribological Investigation of Applicability of Nano-Sized Cupricoxide (CuO) Ceramic Material in Automotive Vehicles," *FME Transactions,* vol. 49., no. 2., pp. 335-353., 2021.

[158] K. Brent Siegbahn, C. Nordling, A. Fahlman, R. Nordberg, K. Hamrin, J. Hedman, G. Johansson, T. Bergmark, S.-E. Karlsson and I. Lindgren, Atomic, Molecular and Solid State Structure Studied by Means of Electron Spectroscopy, Uppsala: Almkvist Wiksells, 1967.

[159] S. Tasarov, A. Kolubaev, S. Belyaev, M. Lerner and F. Tepper, "Study of Friction Reduction by Nanocopper Additives to Motor Oil," *Wear,* vol. 252., no. 1-2., pp. 63-69., 2002.

[160] I. Barin, O. Knacke and O. Oubaschewski, Thermochemical Data of Pure Substances, Wienheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1995.

[161] Á. Tóth, Á. Szabó, J. Rohde-Brandenburger and R. Kuti, "Impact of Yttria Reinforced Nanolubricants onto the Tribological Properties," *Hidraulica,* vol. 3., pp. 26-34., 2021.

A jelölt tudományterületen belül megjelent önálló publikációinak jegyzéke

[s1] Á. D. Tóth, J. Knaup: Különböző kenőolaj adalékok tribológiai tulajdonságainak vizsgálata, in: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT) XXIV. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, OGÉT 2019, pp. 565-568.

[s2] Á. D. Tóth: Különböző súrlódáscsökkentő kenőolajadalékok tribológiai hatásainak vizsgálata, in Műszaki Katonai Közlöny, 29. évfolyam, 1. szám, 2019, pp. 43-56.

[s3] D. O. Csepreghy, Á. D. Tóth, J. Knaup: Ultra-alacsony viszkozitású kenőolajak tribológiai tulajdonságainak vizsgálata in: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT) XXIV. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, OGÉT 2019, pp. 71-74.

[s4] Á. D. Tóth, K. Schintzel, A. Dudás: Kerámia erősítésű, atmoszférikus plazmaszórt, korrózióálló hengerfal-bevonatok súrlódási tulajdonságainak vizsgálata, in: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT) XXIV. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, OGÉT 2016, pp. 443-446.

[s5] Á. D. Tóth, L. Paulovics, B. Hanula, J. Knaup, A. Kopp: Methodenentwicklung zur Einstufung von Motorölen anhand tribologischer Eigenschaften, in: 58. Tribologie Fachtagung, Gesellschaft für Tribologie e.V. (GfT) 2017, pp. P8/1 – P8/11.

[s6] Á. D. Tóth: ZrO_2 anyagösszetételű nano-méretű kerámia anyag kenőolaj-adalékként való használhatóságának vizsgálata, in Kutatási jelentés 1., Universitas-Győr Nonprofit Kft., Győr, 2019, pp. 257-263.

[s7] Á. D. Tóth: Investigation of the tribological properties of selected nano-ceramic materials as lubricant additives in automotive engine oils, in Tavaszi Szél Konferencia 2019: Nemzetközi Multidiszciplináris Konferencia: Absztraktkötet, Doktoranduszok Országos Szövetsége (DOSZ) Budapest, 2019, pp. 191-200.

[s8] Á. I. Szabó, Á. D. Tóth, J. Knaup: Nano-méretű cirkónium-dioxid kerámia kenőolaj adalékként való alkalmazhatóságának vizsgálata in: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT) XXIV. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, OGÉT 2019, pp. 505-508.

[s9] Á. D. Tóth, J. Knaup: Investigation of the tribological properties of nano-scaled ZrO_2 and CuO additive in automotive lubricants in: IOP Conference Series: materials Science and Engineering, vol. 903, 2020, 012015.

[s10] Á. D. Tóth, Á. I. Szabó, R. Kuti: Tribological Poperties of Nano-Sized ZrO_2 Ceramic Particles in Automotive Lubricants, in: FME Transactions, vol. 49, 2021, pp. 36-43.

[s11] Á. D. Tóth, T. Fodor: Nanoméretű réz(II)-oxid kerámiarészecskékkel erősített kenőolaj tribológiai vizsgálata, in: Hadmérnök, vol. 15, no. 3, 2020, pp. 75-92.

[s12] Á. D. Tóth, Á. I. Szabó, J. Rohde-Brandenburger, R. Kuti: Tribological Investigation of Applicability of Nano-Sized Cupricoxide (CuO) Ceramic Material in Automotive Vehicles, in: FME Transactions, vol. 49, 2021, pp. 335-343.

[s13] Á. D. Tóth, Á. I. Szabó, J. Rohde-Brandenburger, R. Kuti: Impact of Yttria Reinforced Nanolubricants onto the Tribological Properties, in: Hidraulica, vol 3, 2021, pp. 26-34.

Mellékletek

1. Melléklet: Optimol SRV®5 tribométer folyamatos keringtetésű rendszeréhez tartozó, nem cserélhető csőszakaszok takarítási folyamata

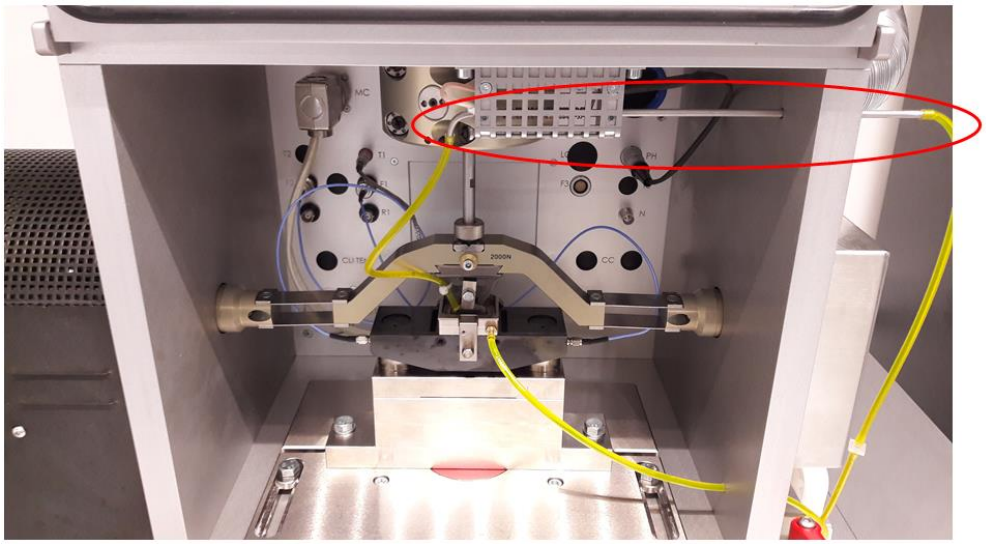
2. Melléklet: Motorolaj minták súrlódási és kopási tulajdonságainak vizsgálata alternáló tribométer segítségével

3. Melléklet: Nanoméretű kerámia szemcsék kenőolajban történő homogenizálási folyamata

Optimol SRV®5 tribométer folyamatos keringtetésű rendszeréhez tartozó, nem cserélhető csőszakaszok takarítási folyamata

Jelen dokumentum a Belsőégésű Motorok és Járműhajtások Tanszék Tribológiai laboratóriumában található Optimol SRV®5 típusú tribológiai mérőberendezés nem cserélhető csőszakaszainak tisztítási folyamatát tartalmazza.

A tisztítási folyamat elsősorban az 1. ábra által ismertetett csőszakaszra vonatkozik. A tribométerhez tartozó többi csőszakasz cserélhető, így azokat nem szükséges tisztítani.



1. ábra: Optimol SRV®5 tribométer mérőkamrája és a hozzá tartozó folyamatos keringtetésű olajrendszer

A csőszakasz tisztasága kiemelt fontosságú két különböző kenőolaj váltása során, hiszen egy elszennyezett olajminta megkérdőjelezheti a mért eredmények pontosságát és hitelességét.

A tisztítási folyamatot mindig az elvégzendő mérések előtt kell elvégezni, így megbizonyosodva arról, hogy a nem cserélhető csőszakaszok megfelelő tisztaságúak.

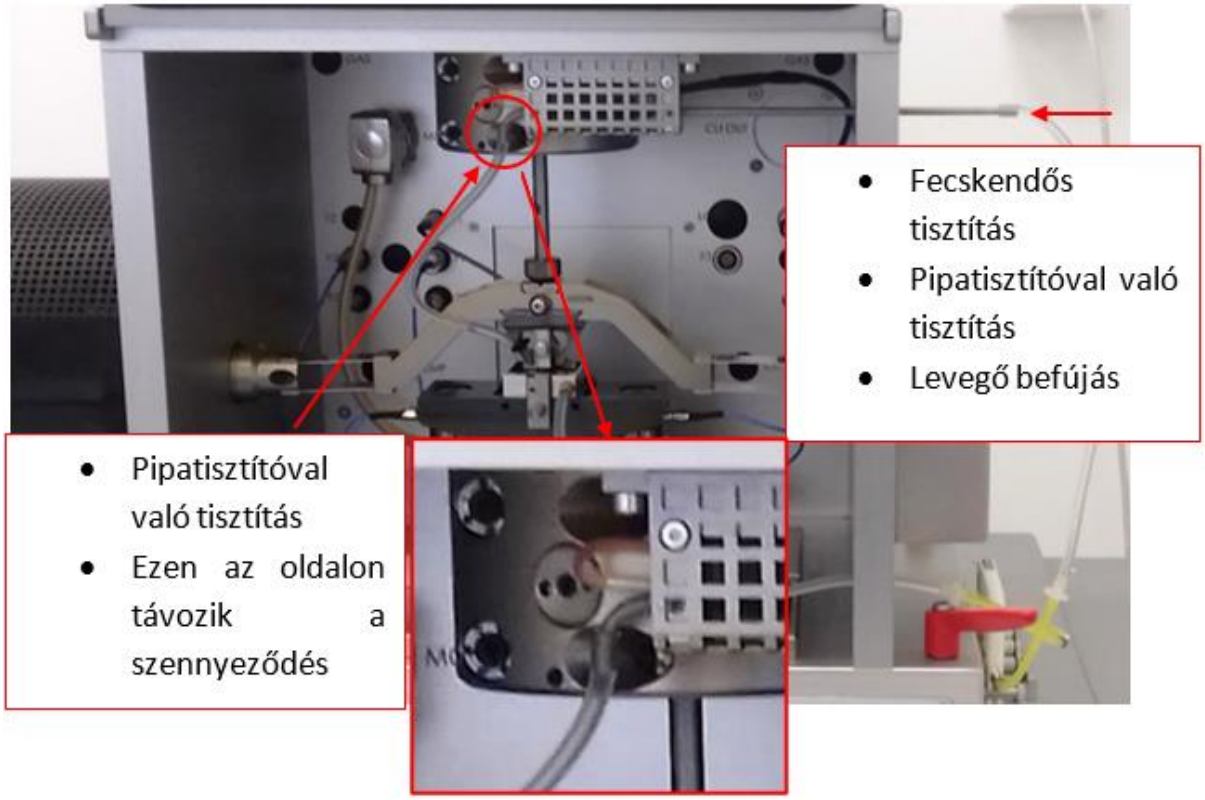
A tisztítási folyamathoz szükséges eszközök és médiumok:

- 1 db 10 ml-es fecskendő, a végére egy 3 cm-es szilikon csőszakasz
- 2 db pipatisztító szál (Ø3 mm, importálja: Danczek Hungary Kft., 1107 Budapest, Száva u 5-7.), amelyet a 2. ábra ismertet.
- 1 db műanyag pohár
- féktisztító folyadék

2. ábra: A tisztítási folyamathoz használandó pipatisztító szálak

A végleges tisztítási folyamat lépései:

1. A cső átmosása két fecskendőnyi (~ 20 ml) féktisztítóval
2. Két db pipatisztító szál összetekerése, és féktisztítóval való lefújása
3. A pipatisztítók csőbe történő helyezése jobb (a tribométerrel szemben állva) oldalról és tisztító jellegű mozgatása
4. A pipatisztító csőbe helyezése a görbület irányából és tisztítás
5. A cső átmosása két fecskendőnyi féktisztítóval
6. A cső szárítása magas nyomású levegővel vagy billentyűzet tisztítóval.



3. ábra: A tisztítás folyamata

A tisztítási folyamat végeztével a következő méréshez betöltendő olajmintából 5 ml-el többet szükséges használni annak érdekében, hogy az esetlegesen a csőszakaszban maradt részecskék, molekulák, illetve a pipatisztító kopadék szemcséi az olajjal eltávozzanak. A feltöltés során az első 5 ml-nyi olaj eltávolításra kerüljön, ezért ezt a mennyiséget a rendszer kivezetésén egy műanyag pohárba kell vezetni. Ehhez ne használjunk a kimeneti csatlakozásnál szilikon csőszakaszt.

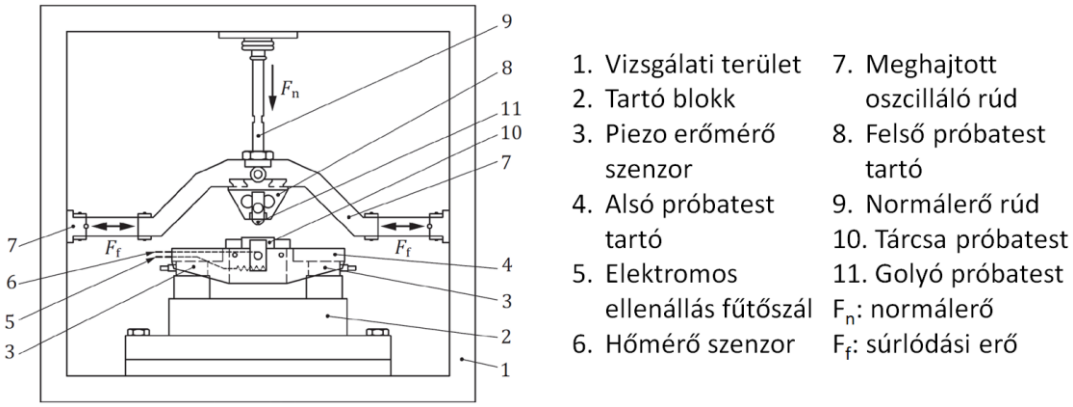
Dátum: 2021. 03. 08.

Szerzők: Nagy Boglárka és Tóth Álmos Dávid

Motorolaj minták súrlódási és kopási tulajdonságainak vizsgálata alternáló tribométer segítségével

Jelen dokumentum különböző motorolaj-minták súrlódási és kopási tulajdonságainak experimentális elemzésének folyamatát ismertetni. A vizsgálati módszer a Belsőégésű Motorok és Járműhajtások Tanszék infrastruktúrájának felhasználására optimalizált. A vizsgálati módszer alapját az ISO 19291:2016-os szabványos kenőolaj vizsgálati módszer adja.

A vizsgálatokhoz az Optimol SRV®5 típusú tribológiai mérőberendezés használata javasolt. A berendezés tartalmaz egy úgynevezett vizsgálati kamrát (1. ábra, 1), ahova el kell helyezni a golyó (11) és tárcsa (10) próbatesteket a számukra elkészített befogókkal (4, 8). Az alternáló mozgást egy elektromágneses elven működő lineáris motornak kell biztosítani integrált löketmérő szenzor segítségével. A vizsgálathoz szükséges normálerőt egy szervomotor és egy terhelő tengely (9) segítségével kell realizálni. Az alsó próbatesttartó blokk (2) egy termostatikusan monitorozott, amelyet egy elektromos ellenállásos fűtőelem biztosít. A rendszer további különböző elektromos vezérlő egységgel van ellátva (meghajtás, terhelés, hőmérséklet, frekvencia, löket), és egy speciális szoftver biztosítja a berendezés számítógép vezérlését. A vizsgálatok során az érintkező felületek között keletkező súrlódási erőt egy piezo-elektromos szenzor méri folyamatosan, amely szenzor az alsó próbatesttartó blokkban (2) került elhelyezésre.



1. ábra: ISO 19291:2016 szabványban ismertetett vizsgáló berendezés sematikus ábrája (forrás: [1])

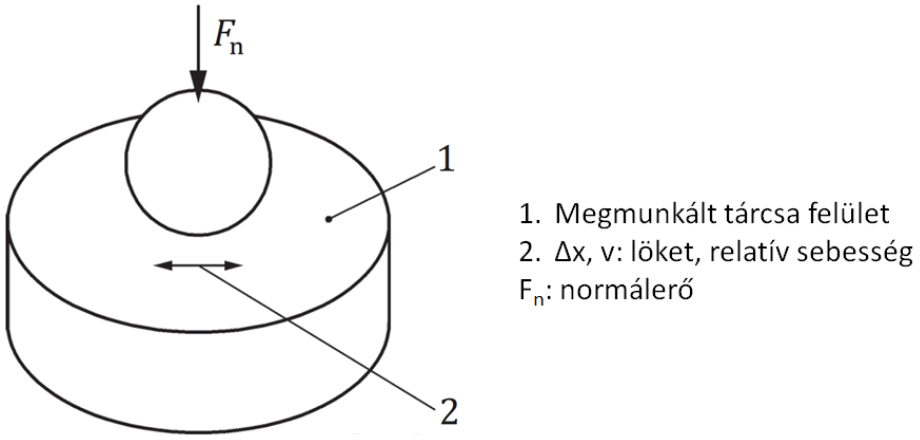
A vizsgálatokhoz használandó próbatesteknek (2. ábra) szigorú előírásoknak kell megfelelniük. A szabvány által előírt adatokat (méret, anyagminőség, keménység, felületi érdesség, hőkezeltségi állapot és megmunkálás) az 1. táblázat és a 2. táblázat ismerteti. A szabvány továbbá részletesen ismerteti a felületi topográfia mérésére szolgáló folyamat szükséges paramétereit is.

1. táblázat: Vizsgálati golyó próbatest előírása ISO 19291:2016 alapján (forrás: [1], szerzői módosítással)

Paraméter	Átmérő	Anyagminőség	Keménység	Ra érdesség
Érték	10 mm	100Cr6 (1.3505)	(60±2) HRC	0,025 ± 0,005 µm

2. táblázat: Vizsgálati tárcsa próbatest előírása ISO 19291:2016 alapján (forrás: [1], szerzői módosítással)

Paraméter	Méret [mm]	Anyag-minőség	Hőkezelés	Kemény-ség	Megmun-kálás	Érdesség [µm]
Érték	átmérő 24 ±0,5	100Cr6 (1.3505)	Edzett	710-820 HV0,2	Leppelés	$0,5<R_z<0,65$
						$0,035<R_a<0,05$
	magasság 7,8 ±0,1	vákuumban újraolvasz-tott		62 HRC ± 1 HRC		$0,02<R_{PK}<0,035$
						$0,05<R_{VK}<0,075$



2. ábra: ISO 19291:2016 szabványban ismertetett vizsgálati próbatestek (forrás: [1])

A vizsgálatokhoz egy speciális tárcsatartó befogó is szükséges, amelyet ezen berendezéshez az Optimol Instruments GmbH. forgalmaz. A befogó tartalmaz egy kivezető csőcsatlakozási helyet, ahova a megvalósítandó folyamatos keringtetésű olajrendszer csőszakasza csatlakoztatható. A beszerezhető tárcsatartó befogót a 3. ábra ismerteti.

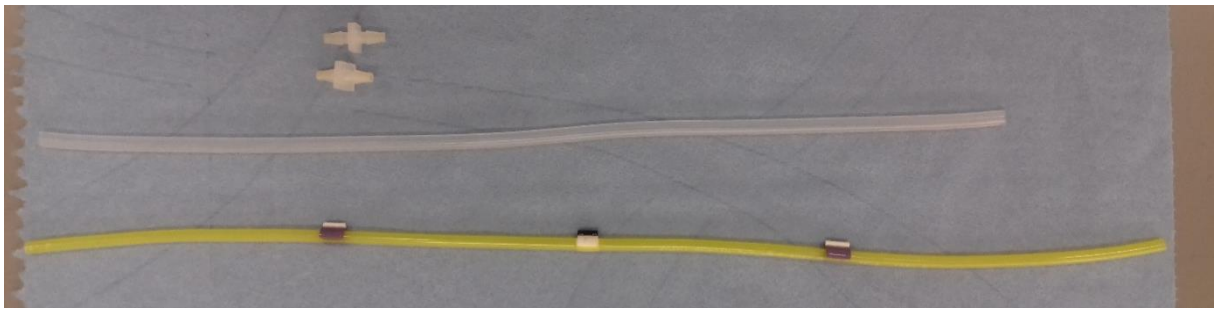
3. ábra: Az Optimol Instruments GmbH. által forgalmazott speciális tárcsa befogó, folyamatos keringtetésű rendszerrel kompatibilis csőcsatlakozási lehetőséggel

A vizsgálati paramétereket tekintve a szabvány pontos értékeket határoz meg:

- Hőmérséklet (T): 100°C
- Löket (Δx): 1,0 mm
- Az oszcilláló mozgás frekvenciája: 50 Hz
- Bejáratási szakasz során használt terhelés: 50 N
- Bejáratás ideje: 30 másodperc
- Vizsgálat időtartama alatt használt terhelés: 150 N
- Vizsgálat ideje a bejáratás után: 2 óra

A szabvány világosan kimondja, hogy a tribológiai vizsgálat csak megfelelő hőmérséklet-kondicionálás után kezdhető meg, amelynek időtartama 5 perc ± 1 perc.

A mérés elindítása mindig egy vizuális ellenőrzéssel történik, amely során a gépkezelő megbizonyosodik arról, hogy a berendezésen nincsen látható sérülés. A tribométer előkészítése a tribométer nem cserélhető csőszakaszának tisztításával kezdődik. A tiszta csőszakasz után a használandó folyamatos keringtetésű olajrendszer csőszakaszainak előkészítése és felszerelése szükséges. A rendszerhez 3 db 2,8 mm belső átmérőjű, egyenként 25 cm hosszúságú szilikon csőszakasz, illetve egy speciális, ütközőkkel ellátott csőszakasz szükséges. A használandó csőszakaszok (4. ábra) a Bondex Kft. szilikontechnika cégtől beszerezhetők. A csőszakaszok csatlakoztatására az Optimol Instruments GmbH. által kínált csatlakoztató szakaszok használandók.



4. ábra: A megvalósított folyamatos keringtetésű olajkörhöz tartozó csőszakaszok és csőszakasz-csatlakozások

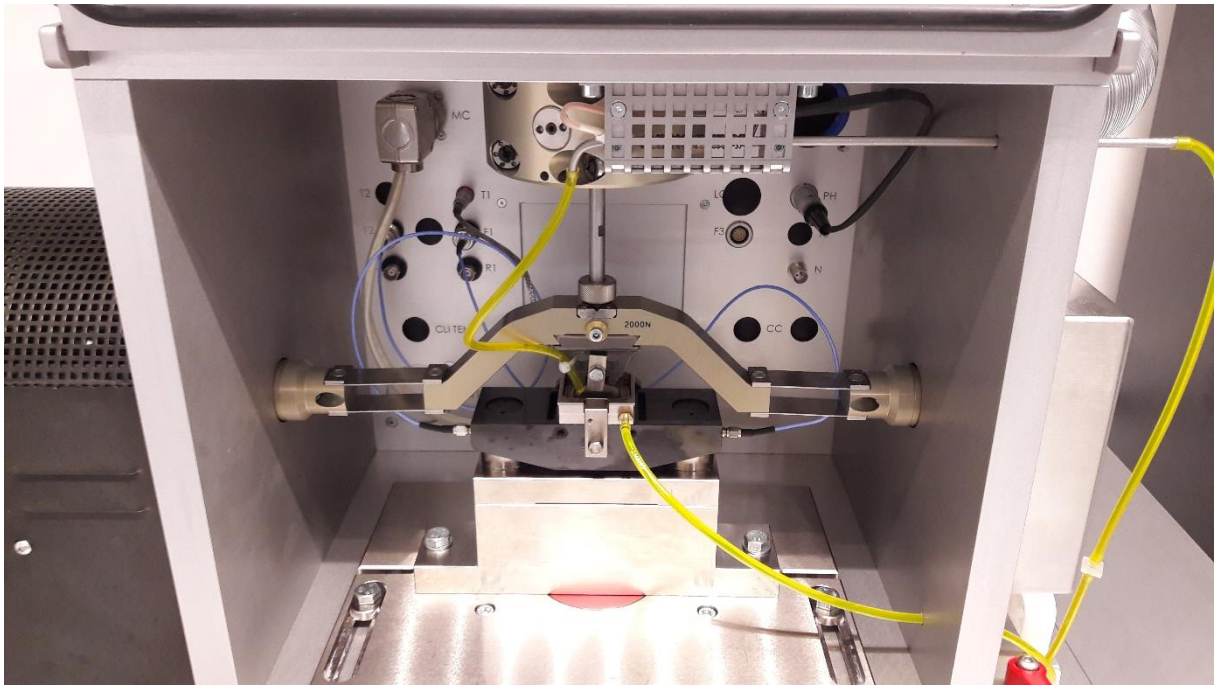
A folyamatos keringtetésű olajrendszer összeszerelése a vizsgálatok előkészítésének kritikus része. Az 5. ábra ábrázolja a megvalósítandó olajrendszer egy részét, a perisztaltikus pumpát. Fontos tudni, hogy a program szerint a pozitív forgási irány az óramutató járásának megfelelő, tehát a csőszakaszokat úgy kell elhelyezni, hogy a pumpa jobb oldali csőszakaszát kell csatlakoztatni a tribométer olajbemeneti ágához, míg a bal oldali részét a kimeneti ághoz.

5. ábra: Az Optimol SRV®5 tribométerhez tartozó perisztaltikus pumpa

Az ütközőkkel ellátott, sárga színű csőszakasz elhelyezése a perisztaltikus pumpába a következő lépés. A csőszakaszt úgy kell elhelyezni, hogy a csőszakaszon található két egymás melletti ütköző a pumpa külső részéhez csatlakozzon, hiszen a perisztaltikus pumpa működéséhez ez szükséges. A perisztaltikus pumpa előkészítését, a csőszakasz beszerelését a 6. ábra mutatja.

6. ábra: A perisztaltikus pumpába megfelelően illesztett csőszakasz

Az olajrendszer további csatlakozásait a 7. ábra ismerteti. A perisztaltikus pumpa jobb oldali kivezető ágát a tribométer jobb oldalán látható csatlakozáshoz kell illeszteni, míg az olajfűtő kivezető részét egy gyorskötöző segítségével a golyóbefogó oldalához kell rögzíteni. Az olajfűtőből kivezető csőszakasz végét 45°-ban célszerű elkészíteni annak érdekében, hogy az olaj a golyóbefogó oldalán lefolyva érintkezzen a használt golyó próbatesttel. A perisztaltikus pumpa bevezető ágát pedig a tárcsabefogó csatlakozási helyéhez kell illeszteni.



7. ábra: Az Optimol SRV®5 tribométeren megvalósított folyamatos keringtetésű rendszer

A vizsgálati próbatesteket ultrahangos tisztítóberendezésben kell tisztítani az ISO 19291:2016-os szabványnak [1] megfelelő kémiai tisztítószerrel (a szabvány példának említi a CAS 64742-49-0 számú vegyszert). Tisztítás után a golyó próbatestet a felső próbatest tartóba (8) kell helyezni, majd a szorító csavart 0,1 Nm-es nyomatékra húzni. A tárcsa próbatestet ezután helyezzük az alsó próbatest befogóba (4), és a hozzá tartozó csavart szorítjuk meg 0,1 Nm-es nyomatékkal. A felső próbatest befogó a golyó próbatesttel behelyezésre kerül a számára kialakított befogási helyre, és a szorító csavart 2 Nm-es nyomatékkal kell meghúzni.

A vizsgálati kenőolaj minta egy 10 ml-es fecskendővel kerül behelyezésre a csőszakaszba. Ezt célszerű a csőszakasz és a tárcsabefogó csatlakozási helyénél megtenni. A perisztaltikus pumpa nem tud levegőt mozgatni, így mindenképpen szükséges fecskendővel feltölteni a csőszakaszt legalább a perisztaltikus pumpa utánig. A további szükséges olajmennyiséget a tárcsabefogóba kell illeszteni folyamatosan, közben 100%-os fordulatszámmal járatva a pumpát annak érdekében, hogy a pumpa maga szívja fel az olajat. A folyamatos keringtetésű rendszerbe addig szükséges tölteni az olajmintát, ameddig az teljesen levegőbuborék-mentes nem lesz. Ehhez, csőszakasztól függően nagyjából 13-15 ml olajminta szükséges.

A beszerelés után egy 50 N-os előterhelést kell eszközölni, amely során a golyó és a tárcsa próbatest egymáshoz nyomódik. Az előterhelés realizálása után a golyó és a tárcsa próbatest megszorító csavarját meg kell lazítani, majd azonnal 2-2,5 Nm-es nyomatékkal megfeszíteni. A vizsgálati program betöltése után következik a kezdeti hőmérsékleti paraméter kondicionálása, azután pedig indítható az automatizált vizsgálat.

Az automatizált tribológiai vizsgálat után szükséges a próbatesteken keletkezett kopás számszerűsítése. A vizsgálatok előtt a korábban ismertetett tisztítási folyamat felhasználásával a próbatestek megtisztítása szükséges. A mérést a mozgási iránnyal párhuzamosan és merőlegesen is el kell végezni, 0,01 mm-es pontossággal, majd a kapott d_1 és d_2 értékeket átlagolni kell. További kopás térfogat meghatározására is van lehetőség, a szabvány két másik szabványra utal ez esetben, az ASTM D7755-re és a DIN 51834-3-ra.

A szabvány azt is ismerteti, hogy legalább évente egyszer egy karbantartási folyamat elvégzése szükséges, a megfelelő szakember által, kiegészítve egy teszt-vizsgálattal. Továbbá egy kalibráló teszt vizsgálat elvégzése szükséges a berendezéssel, havi rendszerességgel, a berendezés-gyártó által forgalmazott próbatestekkel, olajmintával és kalibráló programmal.

Dátum: 2021. 03. 08.

Szerző: Tóth Álmos Dávid

Irodalomjegyzék

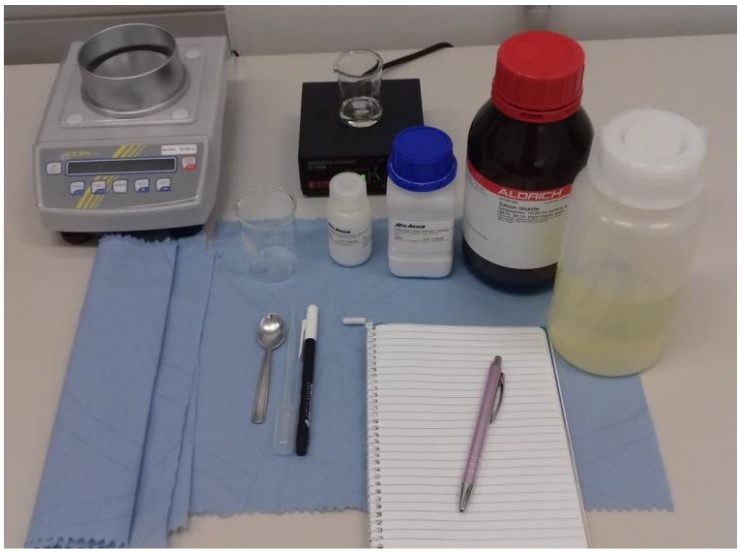
[1] ISO 19291:2016, *Lubricants - Determination of tribological quantities for oils and greases - Tribological test in the translatory oscillation apparatus*, Vernier, Genova: International Organization for Standardization, 2016.

Nanoméretű kerámia szemcsék kenőolajban történő homogenizálási folyamata

Jelen dokumentum nanoméretű szemcsék kenőolajban történő homogenizálási folyamatát ismerteti. A folyamat elsősorban a Belsőégésű Motorok és Járműhajtások Tanszékének infrastrukturális hátterére készült.

A nanoméretű szemcsék, méretük alapján veszélyes kategóriába sorolandók, mivel szállóporként nagyon könnyen belélegezhetők és a tüdőben letapadva károsodásokat okozhat. A nanoméretű adalék egészen addig tekinthető veszélyesnek, amíg az adalék folyadékkal, olajjal nincs fedve. Ennek elkerülése érdekében különböző biztonsági óvintézkedések és szabályok betartása szükséges. A szemcsékkel való érintkezés során nitril-kesztyű és porvédő maszk használata kötelező. Mivel a nanoméretű szemcsék ebben a szállópor formában általában több 10, több 100 szemcse agglomerátumából állnak, így ezeket az agglomerátumokat a porvédő maszk képes megszűrni. Ilyen állapotban nagyon ritka, hogy a szemcsék egyszemcse formában legyenek jelen, a szemcsék közötti másodlagos Van der Waals-erők miatt a nagyobb agglomerátumok a jellemzőek. Minden egyes felhasznált adalék biztonsági adatlapjának alapos áttanulmányozása után szabad csak megkezdeni a keverési folyamatot, amely tartalmazza a különböző biztonsági óvintézkedéseket, illetve az esetleges orvosi teendőket probléma esetén.

A kísérleti adalék-olaj minta elkészítéséhez az alábbi eszközök szükségesek: 2 törlőpapír, műanyag pipetta, vegyszerkanál, bázisolaj, adalék, mágneses keverő és a hozzá tartozó teflon-bevonatú mágneses keverőbaba, főzőpohár, illetve a koncentrációs számításokhoz papír, toll, számológép, illetve stopperóra. Az elkészítéshez használható eszközöket az 1. ábra vizualizálja.



1. ábra: A kísérleti adalék-olaj minta elkészítéséhez szükséges berendezések és eszközök

A keverési folyamat első lépése a szükséges adalék-olaj koncentráció tömegszázalékának (wt%) meghatározása. A megfelelő mennyiségek kimérése érdekében ki kell számolni a később szükséges olajminta mennyiségek minimális (V_{min}) és maximális (V_{max}) mennyiségét. A minimálisnál kevesebb olajminta nem elegendő a tervezett későbbi vizsgálatok elvégzése érdekében, míg a maximum mennyiséget a használt főzőpohár mérete, illetve a használt mérleg maximális mérési tartománya befolyásolja.

A keverési folyamat során kiszámolt adatokat (részarány, adalék tömeg, szükséges olaj tömeg) célszerű egy füzetbe lejegyezni, biztonsági megfontolásokból. Amennyiben a laborban áramszünet keletkezik, ne kelljen a teljes mintát újra keverni.

A keverési folyamat előkészítéseként ki kell számítani azt az arányszámot (R), hogy a szemcsék tömegéhez képest mennyivel több tömegű olajra van szükség a végső olajminta elkészítéséhez. Ehhez az alábbi egyenlet felhasználása szükséges:

$$R = \frac{olaj\ részaránya}{adalék\ részaránya} \tag{1}$$

A részarányt felhasználva kiszámolandó az olajmintához szükséges adalék tömegének minimális (A_{min}) és maximális (A_{max}) korlátja. A két korlát közötti adalék tömeget kell első lépésben a keverőpohárba juttatni.

A használt mérleg beállításainak ellenőrzése kiemelt fontosságú, a mérleg vízszintes helyzete, illetve a mérleg lábainak stabilitása fontos. A beállítás akár 1 percet is igénybe vehet.

A mérleg tárázása után a mérlegre kell helyezni a főzőpoharat, feljegyezni a tömegét, majd újra tárázni. A főzőpohárba kell helyezni az adalékból egy olyan mennyiséget, amely a

minimális és a maximális korlát között van (A_{min} és A_{max}). A főzőpohárba helyezett adalék tömege A_{real}. Fontos megjegyezni, hogy az adalékot célszerű nagyobb adagokban a főzőpohárba ejteni, ellenkező esetben a pohár statikus töltöttsége miatt a pohár falára tapad az adalék, amely egyrészt szállóporként veszélyes lehet, másrészt rontja az elkészült keverék koncentrációjának pontosságát.

Következő lépésként az olajat kell műanyag pipetta segítségével a főzőpohárba helyezni, a megadott tömegben. A pontos olajtömeg (O_{real}) meghatározható a főzőpohárba helyezett adalék tömegéből (A_{real}), illetve a korábban meghatározott arányszámból (R):

$$O_{real} = R \cdot A_{real} \tag{2}$$

A kiszámított tömegnyi olajat (O_{real}) a főzőpohárba kell juttatni. Célszerű az olajat a főzőpohár oldalán végig csorgatva bejuttatni a főzőpohárba, így megakadályozható az adalék szállóporrá válása, hiszen a pohár így alulról töltődik fel olajjal.

A pontos tömegű adalék és olaj kimérése után a főzőpohár levehető a mérlegről és egy teflonbevonatú mágnest, úgynevezett mágneses keverőbabát kell helyezni a keverékbe. Ezután a főzőpoharat a kikapcsolt mágneses keverőre (2. ábra, bal) kell helyezni. A mágneses keverő ezután bekapcsolható és 10 percen keresztül 1000 rpm fordulatszámmal üzemeltethető. A mágneses keverés időtartama alatt a következő lépésben használatos ultrahangos homogenizáló előfűtése megkezdendő, 50°C-os hőmérsékleti értékkel. A 10 perces mágneses keverés után a főzőpohár az ultrahangos homogenizálóba (2. ábra, jobb) helyezendő és 30 percen keresztül homogenizálandó. Az ultrahangos homogenizáló nagyfrekvenciájú (20-400 kHz) hanghullámokkal kavitációt hoz létre az olajban és ezzel fellazítja az adalék agglomerációit, így homogenizálva a keveréket.

2. ábra: A Belsőégésű Motorok és Járműhajtások Tanszék Tribológiai Laboratóriumában található ultrahangos homogenizáló (balra) és mágneses keverő (jobbra)

Az ultrahangos homogenizálási lépés után a keverék visszakerül a mágneses keverőre és folyamatosan kevert állapotban annyi részre osztandó, ahány mérésre készült az összekevert minta. A szétosztást fecskendőkkel szükséges elvégezni és minden szétosztott mintába kerül egy mágneses keverőbaba.

Az egyes szétosztott minták felhasználása előtt az olajminta a 10 perces, 1000 rpm-es mágneses keverésen és a 30 perces ultrahangos homogenizáláson újra át kell, hogy essen. Az ultrahangos homogenizálás után az olajminta visszakerül a mágneses keverőre és egészen addig kevert állapotban marad, amíg nem kerül betöltésre fecskendő segítségével a tribométerbe.

Fontos megjegyezni, hogy az ultrahangos homogenizálás után a minta hőmérséklete megemelkedik, ezáltal lecsökken a viszkozitása. A lecsökkent viszkozitású olajminta a mágneses keverés során könnyebben fröcskölődik, ezért előfordulhat, hogy ilyen esetben a mágneses keverő fordulatszáma csökkentendő.

Dátum: 2021. 03. 08.

Szerzők: Szabó Ádám István és Tóth Álmos Dávid