



**SZÉCHENYI
EGYETEM**
UNIVERSITY OF GYŐR
GÉPÉSZMÉRNÖKI, INFORMATIKAI
ÉS VILLAMOSMÉRNÖKI KAR

TDK dolgozat

Oxid nanorészecske keverékek tribológiai hatásainak vizsgálata motorolaj adalék célú felhasználásra

Marsicki Márk

EUM9DO

**Gépészmérnöki BSc szak
Gyártástechnológia szakirány**

Belső konzulens:

Szabó Ádám István

Járműhajtás Technológia Tanszék

Győr, 2023

Kivonat

Oxid nanorészecske keverékek tribológiai hatásainak vizsgálata motorolaj adalék célú felhasználásra

A nanorészecskék a motorolajok a súrlódás- és a kopáscsökkentő hatását fokozni képesek. A dolgozat célja a különböző nanorészecske keverékek alkalmazása bázisolajban és az így létrejött olajminták komplex tribológiai analízise. A dolgozat betekintést ad a kenőolajok funkciójába és felépítésébe, az alapolajok előállításának folyamatába és a különböző tulajdonságok növelése érdekében használt eljárásokba. A kiválasztott nanorészecskék – Y_2O_3 , ZrO_2 , SiO_2 , CuO – etil-oleátos felületaktiváláson mentek keresztül, így a Group III alapolajba kevert nanoadalék diszperzitása biztosítható. A különböző keverékek összeállításához előzetes mérések eredményei szolgáltak. A kísérletek egy lineáris, oszcilláló tribométeren történtek folyamatos olajkeringetésű golyó-tárcsa rendszerben. A mérések 2 órán keresztül futottak $100\text{ }^\circ\text{C}$ hőmérsékleten, 100 N terhelésen. A méréseket követően a próbatestek kopásának nagysága digitális mikroszkóppal, a tárcsa kopásának térfogata konfokális mikroszkóp segítségével lett meghatározva. A kiértékelt eredmények alapján megállapítható, hogy az $\text{Y}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2$, $\text{ZrO}_2+\text{Y}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2$, $\text{Y}_2\text{O}_3+\text{CuO}$ keverékek potenciális súrlódáscsökkentő hatása egyértelmű, mert az integrált súrlódási együtthatót 3-8%-kal, míg a súrlódási együtthatót 7-17%-kal csökkentette a koncentrációk függvényében. Az $\text{Y}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2$, $\text{Y}_2\text{O}_3+\text{CuO}$ keverékek kitűnő kopáscsökkentő hatással rendelkeznek, mert a kopástérfogatot 87-94%-kal, a golyó kopását pedig 18-36%-kal csökkentik. A kopástípusok meghatározásában pásztázó elektronmikroszkópos felvételek segítettek. A felületre lerakódott/beépült nanorészecskék energiadiszperzív röntgenspektroszkópia használatával lettek kimutatva. Az $\text{Y}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2$ és $\text{Y}_2\text{O}_3+\text{CuO}$ keverékek reális opciók a jövőbeni motorolajok kopáscsökkentő adalékainak szerepére. Az eredmények megfelelő alapot biztosítanak további motorolajfejlesztési kutatások végrehajtásához.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
2. Kenőolajok	1
2.1. Alapolajok.....	2
2.2. Group III alapolaj.....	2
2.3. Adalékok.....	3
2.3.1. Detergens-diszpergens adalékok	3
2.3.2. Különbség detergens és diszpergens adalék között.....	3
3. Nanorészecskék	4
3.1. Fém nanorészecskék előállítása és folyamatok ismertetése	5
3.2. Nanorészecskékre jellemző legfontosabb tulajdonságok	7
3.3. Nanorészecskék csoportosítása.....	8
4. Kísérlet folyamán felhasznált anyagok és próbatestek	10
4.1. Felhasznált anyagok jellemzői.....	10
4.2. Felhasznált próbatestek jellegzetes tulajdonságai és méretei	11
5. Kísérletben használt berendezések.....	11
5.1. Optimol SRV®5 tribométer.....	11
5.2. Keyence VHX-1000 digitális mikroszkóp.....	14
5.3. Leica DCM3D konfokális mikroszkóp.....	14
5.4. Hirox SH-4000 M pásztázó elektronmikroszkóp	15
5.5. Bandelin RK 255 H ultrahangos tisztító	16
6. Kísérleti eredmények.....	16
6.1. Kísérlet folyamata.....	17
6.1.1. Felületaktiválás folyamata.....	17
6.1.2. Olajkeverés folyamata.....	20
6.1.3. Munkadarabok használat előtti tisztítása	23
6.1.4. A használt tribométer beüzemelésének folyamata	24
6.1.5. Mérések kiértékelésének folyamata	25
6.2. Kísérletet megelőző mérések.....	27
7. Kísérleti mérések és eredményei.....	29
7.1. Group III bázisolajjal készített mérések	29

7.2. 0,25% Y_2O_3 + 0,25% SiO_2 nanorészecske keverék hatása.....	29
7.3. 0,5% Y_2O_3 + 0,5% SiO_2 nanorészecske keverék hatása.....	31
7.4. 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 nanorészecske keverék hatása.....	33
7.5. 0,4% ZrO_2 + 0,3% Y_2O_3 + 0,3 SiO_2 nanorészecske keverék hatása.....	35
7.6. 0,5% Y_2O_3 + 0,5% CuO nanorészecske keverék hatása.....	36
7.7. Tárcsák kopástípusainak meghatározása	37
7.7.1. 0,25% Y_2O_3 + 0,25% SiO_2 tartalmú keverékhez tartozó kopásnyom kopástípusainak meghatározása.....	38
7.7.2. 0,5% Y_2O_3 + 0,5% SiO_2 tartalmú keverékhez tartozó kopásnyom kopástípusainak meghatározása.....	39
7.7.3. 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 tartalmú keverékhez tartozó kopásnyom kopástípusainak meghatározása.....	40
7.7.4. 0,4% ZrO_2 + 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 tartalmú keverékhez tartozó kopásnyom kopástípusainak meghatározása	40
7.7.5. 0,5% Y_2O_3 + 0,5% CuO tartalmú keverékhez tartozó kopásnyom kopástípusainak meghatározása.....	41
7.8. Kopásfelületek összetételének vizsgálata	41
7.8.1. 0,25% Y_2O_3 + 0,25% SiO_2 tartalmú keverékhez tartozó kopásnyom felületi összetételének vizsgálata.....	42
7.8.2. 0,5% Y_2O_3 + 0,5% SiO_2 tartalmú keverékhez tartozó kopásnyom felületi összetételének vizsgálata.....	43
7.8.3. 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 tartalmú keverékhez tartozó kopásnyom felületi összetételének vizsgálata.....	45
7.8.4. 0,4% ZrO_2 + 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 tartalmú keverékhez tartozó kopásnyom felületi összetételének vizsgálata	46
7.8.5. 0,5% Y_2O_3 + 0,5% CuO tartalmú keverékhez tartozó kopásnyom felületi összetételének vizsgálata.....	48
7.9. Költségkalkuláció	51
8. Konklúzió	51
9. Irodalomjegyzék.....	53

1. Bevezetés

Jelen dolgozat témája a nanokerámia keverékek tribológiai hatásainak vizsgálata motorolaj adalék célú felhasználásra. A motorolajok mindennapjainkban használatos járműipari cikkek, melyek belsőégésű motorok kenésére használatos kenőanyagok. Ezen motorolajok elsődleges feladata a motor mozgó alkatrészeinek kenése, a súrlódási együttható csökkentése és a fém-fém érintkezésének akadályozása, hőelvezetés, motor tisztántartás, tömítés és korrózió elleni védelem.

Napjainkban már fontos szemponttá vált az is, hogy a járművek a lehetőségekhez mérten, a lehető legkevesebb káros anyagot tudják kibocsátani. Az autók által kibocsátott szén-dioxid az éghajlatváltozásra különösen nagy hatással van. Mivel a szén-dioxidnak van a legnagyobb szerepe a globális felmelegedésben, így a levegőbe kerülő káros anyag csökkentése az elsődleges szempont minden területen, de főképp a közlekedésben használt járműveknél kapnak nagy figyelmet.

A károsanyag-kibocsátás a megfelelő motorolaj kiválasztásával is csökkenthető. Egy motorolaj, ha jó kenést biztosít, azzal csökkenti a súrlódási értékeket és ezzel együtt hozzájárul a kevesebb szén-dioxid kibocsátáshoz is. Az érintkező felületek között, ha kicsi a súrlódás, akkor a tüzelőanyag fogyasztás és az ezzel együtt járó levegőbe jutó károsanyagok mennyisége is csökkenni fog. Mindez annak köszönhető, hogy az érintkező felületek között kisebb mértékű lesz az ellenállás, amikor egymáson elmozdulnak így a mozgatáshoz szükséges energiamennyiség is kevesebb lesz.

A motorolajokat próbálják úgy fejleszteni, hogy eleget tegyenek a velük szemben alátámasztott követelményeknek, melyekről feljebb már volt említés, de mégis különös figyelmet fordítanak a súrlódás csökkentésére és kevésbé veszik figyelembe az alkatrészek élettartamát. A súrlódás minimalizálására számos kísérletezés és kutatás történt már. Az utóbbi időkben egyre nagyobb figyelmet kapnak az alapolajokba adagolt nanoszemcsék, melyek hozzájárulnak az alkatrészek között fellépő súrlódás csökkenéséhez és az alkatrészeket is képesek megóvni úgy, hogy egy bevonatot hoznak létre az alkatrész felületén.

2. Kenőolajok

A mostanában használt kenőolajok két egységből állnak, mégpedig alapolajból (vagy alapolajok keverékéből) és adalékokból. A kenőolajok elvárt alkalmazási tulajdonságait és a minőségi jellemzőit az alapolaj és az adalékok harmonikus egysége biztosítja [1].

2.1. Alapolajok

A környezetbarát és magas teljesítményű motorolajok elkészítéséhez az alapolajokkal szembeni elvárások megnöttek, mivel a motorolaj fő alkotórésze (~70%) az alapolaj. Ez vezetett a kis foszfor-, szulfáthamu- és kéntartalmú motorolajok kifejlesztéséhez. Az alapolajnak több nézőpontnak is meg kell felelni a megfelelő használhatóság és környezetbarát tulajdonság megőrzése érdekében, mint például [1]:

- megfelelő viszkozitási fokozat
- megfelelő viszkozitási-hőmérsékleti viselkedés, nagy viszkozitás-index (VI)
- nagy teherviselő képesség
- jó kenőképesség
- kedvező súrlódási tulajdonságok széles igénybevételi tartományban
- magas lobbanáspont és alacsony dermedéspont a jó kopáscsökkentő hatás érdekében
- tág hőmérsékleti határok közötti működőképesség
- jó adalékérzékenységi tulajdonság
- minimális kéntartalom és illékonyság
- minél kisebb mértékű habosodás
- a teljes működési tartományban nagy hő- és oxidáció stabilitás
- jó kémiai és hidrolitikus stabilitás
- lehetőleg hamumentes égés
- mérgező anyagot nem tartalmazhat
- kielégítő korróziógátló hatás
- adalékoldó képessége nagy legyen és összeférhetőnek kell lennie szerkezeti anyagokkal, mint például tömítésekkel
- biolbonthatóság és környezetbarátság mellett reális áron való beszerezhetőség

Az élettartam növeléshez és motortisztasághoz, valamint a kisebb tüzelőanyag fogyasztáshoz, a katalizátorrendszerek aktivitásának fenntartásához és az olajcsereperiódushoz nagyban hozzájárul az alapolajokkal szemben előállított követelmények betartása, mely egy nagyon fontos tényező ezen a területen [1].

2.2. Group III alapolaj

A Group III típusú alapolajat hidrogéngázos folyamat során állítják elő magas

hőmérsékleten és nyomáson. A folyamat végeztével egy tiszta és színtelen alapolaj kapható, melynek viszkozitási indexe nagyobb, mint a 120-as érték. Ezen csoport az I-es csoportnál jobban ellenáll az oxidációnak, de az előállítási költsége nagyobb, mint a Group I és Group II-es csoportba tartozó olajoké [2].

Műszaki és marketing szempontból is megközelíthető ez az olaj. Mivel közvetlenül nyersolaj finomításból származnak, így műszaki szempontból még ásványolajnak tekinthetjük őket. Marketing szempontjából már más a helyzet, mivel új kémiai olajszerkezetet hoz létre, amely még a folyamat kezdetén nem voltak jelen. Ez a szigorúbb hidrogénezési folyamat során megy végbe, ezért félszintetikus olajnak tekintik [2].

2.3. Adalékok

Az alapolajok önmagukban nem felelnek meg teljes mértékben a gyártók által alátámasztott követelményeknek, emiatt adalékanyagokat adnak hozzá az alapolajhoz, ezáltal javul az antioxidációs képesség, tribológiai tulajdonságok és egyéb jellemzők [3].

2.3.1. Detergens-diszpergens adalékok

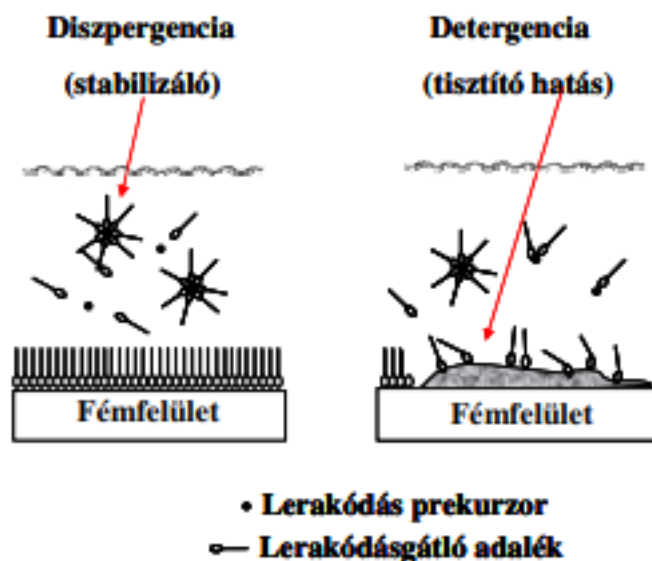
A detergens és diszpergens adalékok több fő javító tulajdonságot hordoznak magukkal, melyek a következők [4]:

- tisztító és tisztántartó hatásúak
- a lerakódásokat megakadályozzák vagy szabályozzák az üzemanyag ellátó és adagoló rendszerben
- hajtóanyagfogyasztást és szén-dioxid kibocsátást is csökkentik

2.3.2. Különbség detergens és diszpergens adalék között

A diszpergens adalékok a nem oldódó komponenseket diszpergálva tartják. Tehát az adalék molekulái a szennyező-részecskékre adszorbeálódnak a poláris részükkel és megakadályozzák a nagyobb agglomerátumok létrejöttét a sztérikus hatás révén [4].

A detergens adalékok egy bizonyos védőfilmet alakítanak ki. Az detergens adalékmolekulák a fémfelülethez kötődnek a poláris csoportjukkal irányított kemisorpció miatt. Így a felületet lefedik és megakadályozzák a depozitumok, azaz a lerakódások képződését. Mindemellett a lerakódásokat el is tudják távolítani a felületről, amely tisztító hatást vált ki. A két adalék molekuláinak viselkedését a 1. ábra mutatja be [4].



1. ábra: Diszpergencia és detergencia [4].

Különbség az adalékok között, hogy a detergens adalékok semlegesítik a savakat és molekula tömege kisebb, mint a diszpergens adalékoké. Mindemellett a detergens adalékok növelik a hamutartalmat és a lerakódásképződést gátolják nagy hőmérsékleten, addig a diszpergens adalékok hamumentesek és kis hőmérsékleten gátolják a lerakódást [5].

3. Nanorészecskék

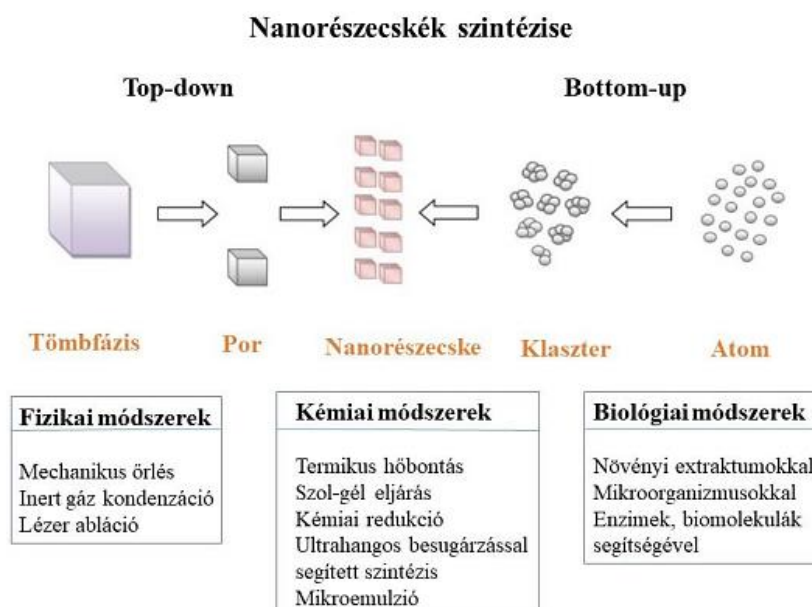
A nanotechnológia a korunk egyik legnagyobb forradalmi áttörése. Nanorészecskéknek nevezik az olyan anyagokat, melyeknek térbeli kiterjedése legalább egy irányba beleesik az egy nanométertől száz nanométerig terjedő tartományba. Az esetek többségében ezt a mérettartományt a részecske átmérőjének szokták definiálni. A nanorészecskék új tulajdonságokat képesek elérni, mely fejleszti a nanotechnológiát és ezzel együtt nő az ipari felhasználhatóságuk különböző területeken. Ide tartozik az elektronika, a kémia, a kozmetika és a gyógyszergyártás is. Minden terület tele van lehetőségekkel, melyek utat nyithatnak a nanorészecskék alkalmazására, új területek fedezhetők fel és ezzel együtt a környezet javulást is eredményezni tudják. A nanoméretű anyagok azzal szemben, hogy javulást is képesek eredményezni a másik végletet is el tudják érni. Kockázatot jelenthet a környezetre, a biztonságra és az egészségre is. Mivel az előbb felsoroltak kockázata fentáll, így használat során szigorú ellenőrzést igényel [6][7].

Ezen nanoanyagok többféle méretben és formában is tervezhetők és gyárthatók. Ezen felül felületmódosításokat is végezhetnek rajta, vagy éppen a kémiájukon is van lehetőség

változtatni. A két paraméter változtatása különböző nanoformákat eredményezhet. Mindemellett a paraméterek különbségei miatt az azonos anyagból álló nanoformák potenciálisan eltérő veszélyes tulajdonságokat eredményezhetnek, így a nanorészecskéknak megvannak a maga veszélyei és kockázatai is, de a kockázatokon és veszélyeken túllendülve nagy fejlődés várható a nanoanyagok alkalmazhatóságának területén a sok kísérletezésből adódóan [7].

3.1. Fém nanorészecskék előállítása és folyamatok ismertetése

Fém nanorészecskéket különböző módokon állítanak elő. Az ipar területén még új ágazatról beszélünk, mégis több eljárás is elterjedt már a nanoanyagok és kompozitok előállítására. Előállítási módszertől eltekintve van két fontos lépés, melyet érdemes kiemelni, amely nem más, mint a méretszabályozás és a kiinduló anyagtól való elszeparálás a végterméket tekintve. Az eljárások fajtáját tekintve a nanoanyagok előállítására vonatkozóan elkülönítenek kondenzálási és diszpergálási módszereket. Diszpergálásnak nevezik, ahol az anyag aprítása vagy darabolása addig történik, amíg el nem éri a kívánt méretnagyságot. Ezzel szemben a kondenzálás egy teljesen fordított eljárás, ennél a folyamatnál egyedi atomokból építik fel a nanoanyagokat. Két megnevezést használnak az eljárásokra, melynél a diszpergálás felülről-lefelé eljárás, a kondenzálás pedig alulról-felfelé eljárás. A két eljárást az 2. ábra szemlélteti [8].



2. ábra: Nanorészecskék szintézisének lehetséges módszerei [11].

Ezen előállítási módhoz szilárd halmazállapotú hordozókat nem használnak fel és párologtatás-kondenzálás módszerével állítanak elő nagy tisztaságú nanoméretű fémrészecskéket. Az eljárás során a makroanyagot egy inert gázból álló közegbe

bepárolgatják, amely az eljárás első lépcsőfoka. A második lépcsőfok, hogy elérjék az inert gáz és a fémgőz keverékének kondenzálódását. A keveréket egy hűtőkamrába vezetik, ahol a hőmérséklet csökkenése miatt kondenzálódik a kamra falán. A szemcseméret kívánt méretének elérése a hőmérséklet szabályozásával befolyásolható. A pontos szemcseméret eloszlásra szigorú szabályozások vonatkoznak, melyeket ez az eljárás nem képes biztosítani, ezen felül kevésbé hatékony, mint társai [8].

Az oldatokból való redukálás széles körben elterjedt, melyet szívesen használnak nanoanyagok létrehozásához is. Az eljárás közben redukálószer közreműködésével fém sókat redukálnak, de az eljárás stabilizátorok alkalmazását is szükségessé teszi mivel, ha nem használnának stabilizátorokat, akkor aggregáció jöhetne létre. Mindemellett a göcképződést és a növekedést is szabályozzák. A stabilizátorok különféle anyagok lehetnek, mint például méretükből adódó kicsi szerves ionok és ionos, valamint nemionos polimerek, esetlegesen ionos tenzidek. A stabilizátorok szerepet játszanak az előállított részecskék méretének létrejöttében, de a fő szerepet nem ők töltik be. A méreteket legjobban befolyásoló tényező a túltelítettség mértéke. Ha az oldat nagyobb mértékben túl van telítve, akkor az oldatban nagyon sok kisméretű részecske fog keletkezni. Ellenkező esetben a részecskék mérete nagyobb lesz és mennyiségét tekintve kevesebb lesz belőle. Emellett részt vesz a méret kialakulásában az oldat pH értéke és koncentrációja, a hőmérséklet, az oldószer és a reakcióidő is [8].

Ahhoz, hogy a részecskéket létre lehessen hozni, ezen esetben egy víz és olaj alapú rendszert használnak. A folyamat igen egyszerű, mely során olajba vizet öntenek, majd ezt diszpergálják. Így nanoméretű vízcseppek fognak létrejönni az olajban és ezek a vízcseppek szolgálnak majd, amik a nanorészecskék előállítási pontjait jelentik – lásd: nanoreaktorok. Ebből adódóan a komponensek méretét a vízcseppek mérete befolyásolja. Fontos a cseppek stabilitása is, melyet tenzidmolekulákkal stabilizálnak [8].

Ezzel a módszerrel az esetek többségében félvezető nanorészecskéket gyártanak. Ide tartoznak a kerámiák, szilikonok és társaik. Ahogy már az előbb említett módszereknél is szükség volt a folyamat során stabilizátorokra, ez a kolloid módszer esetében is nélkülözhetetlen. A fém-szulfidok esetében a folyamat során csapadékképződés játszódik le a kiinduló oldatban, melyet egy adott időpontban megszakítanak. A csapadékképződés megszakításával érhető el és szabályozható a szemcseméret, de befolyásolhatja a szemcsék méretét a pH érték változása is. A fém-szulfidok és a fém-oxidok előállítása között különbséget kell tenni, mivel a fém-oxidok előállítása során a saját sójának hidrolízisével megy végbe a folyamat [8].

Ebben a folyamatban nanoreaktorként használhatók ásványok is, abban az esetben, ha a

kristályszerkezete szabályos, amely azt jelenti, hogy a rétegek egymástól való távolsága állandó. Az egyik csoport, amelynek a szerkezete szabályos az agyagásványok. A módszer folyamata, hogy a megfelelő tulajdonsággal rendelkező anyag felületén adszorbeáltatják a kiindulási anyag sójának az ionjait. A részecskék mérete attól függ, hogy az ásványi rétegek közti távolság milyen nagyságú [8].

3.2. Nanorészecskékre jellemző legfontosabb tulajdonságok

Az előállított nanorészecskék jellemzésére különféle módszereket alkalmaznak, melyek segítségével képet lehet kapni a nanoanyagok fizikai és kémiai tulajdonságairól. Az 1. táblázat tartalmazza a nanoanyagok legfontosabb tulajdonságait a jellemezhetőség szempontjából [9].

Kémiai jellemző	Fizikai jellemző	Alapvető viselkedés	Reakcióképesség
Kémiai összetétel	Részecskeméret/tartomány	Oldhatóság	Fizikai veszélyek
Szennyeződések	Morfológia	Hidrofóbitás	Biológiai (re)aktivitás
Felületi jellemzők	Felületi terület	Diszpergálhatóság	Fotoreaktivitás
		Porosság	

1. táblázat: Nanorészecskék jellemezhetősége [9].

A jelenlegi információk a nanoanyagok fizikai és kémiai tulajdonságairól javarészt fémek és fém-oxidok tanulmányozásából származnak. Bizonyos tulajdonságok csak egy csoporthoz tartozó nanorészecskékre határozhatók meg. Például a porosság, csak és kizárólag porokra vonatkozik így elmondható, hogy egyes tulajdonságok rendszerfüggők. Az anyagok viselkedését a kémiai összetétel, kristályszerkezet és a járulékos szennyező anyagok megléte befolyásolja. Kristályszerkezetet tekintve egy nanorészecske lehet teljesen ártalmatlan és toxikus is [9].

A felületi jellemzők magába foglalják a bevonatok kémiáját és funkcionálását. Ez fontos szerepet játszik abban, hogy mennyire reakcióképes az adott részecske, mivel ezáltal megtudható mennyire képes kölcsönhatásba kerülni más anyagokkal. A nanoanyagok fajlagos felülettel jellemezhetők, mely minél nagyobb értékű, annál nagyobb a reakcióképessége az adott anyagnak. Másik jellemző melyet megtudhatunk belőle, hogy ütközések során mennyire képesek összetapadni, esetlegesen egyesülni. Ezeknek a reakcióknak a megnevezése az aggregátum és az agglomerátum képződés. Az előbbi esetében a részecskék között lévő összetartó erő erősebb, az utóbbinál pedig gyengébb. Azt, hogy a felületükön a részecskék milyen mértékben tudnak molekulákat és ionokat megkötni a felületi töltés határozza meg [9].

Az oldhatóság magába foglalja a víz egyensúlyi oldhatóságát és megfelelő közegben való

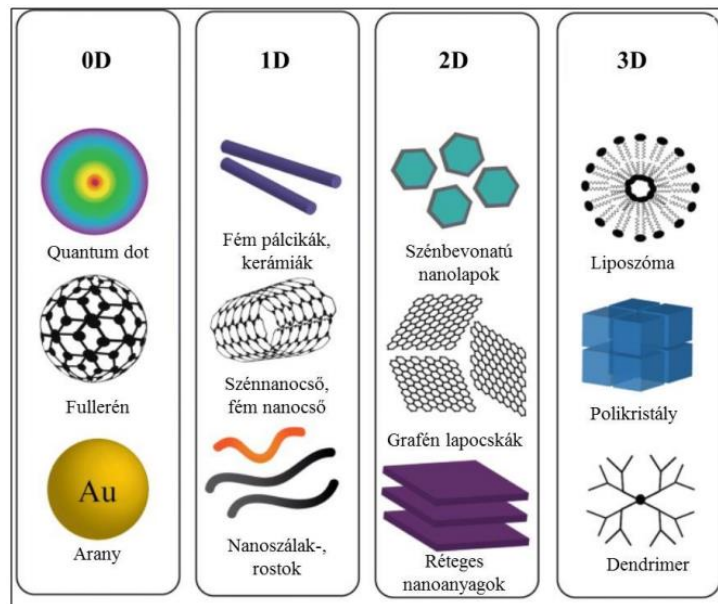
oldódás sebességét. Az oldhatóság befolyásolja a részecskék eloszlását, de a diszpergálhatóság függvényében is változik a részecskék eloszlása. A paraméterek három fő szemponttól függnnek, melyek a hőmérséklet, a nyomás és a pH érték [9].

A nanorészecskék jellemezhetősége szempontjából legfontosabb a részecskék alakja és mérete. Ezekből az adatokból következtetni lehet az adott nanorészecske viselkedésére és kémiai, fizikai tulajdonságaira. A mérettulajdonságok jellemzésére különböző módszerek léteznek, melyek egymást kiegészítve szükséges alkalmazni. Több kísérletezés is történt amely kimutatta, hogy az ugyanabból az anyagból előállított nanorészecske, melynek alakja eltért az összehasonlítni kívánt anyagétól fizikai és kémiai tulajdonságai is eltérőek voltak és viselkedését tekintve is elmondható volt a változás [9][10].

3.3. Nanorészecskék csoportosítása

A nanorészecskék megtalálhatók természetben és mesterséges úton előállított formában is, így a nanorészecskék összetételükben különbözők lehetnek. Amellett, hogy összetételükben különbözők a nanorészecskék térbeli kiterjedése is sokszínűséget mutat.

A nanorészecskék térbeli kiterjedését tekintve, 4 csoportba oszthatók: 0D, 1D, 2D és 3D csoportok. Az első a 0D, melynél a nanorészecske mindhárom irányú kiterjedése az 1 nm alatti tartományba esik bele, ezeket az anyagokat kvantumpöttynek is nevezik. Az 1D csoportjába eső anyagok, azok az anyagok melyeknek az egyik dimenziójuk kiesik a 1-100 nm-es tartományból és csak kettő dimenzióban volt képes az 1-100 nanométeres tartományba beleesni. Ilyen esetekben nanorudakról van szó. Az előzőhöz hasonlóan 2D csoportjába azok az anyagok tartoznak, melyeknek a térbeli kiterjedése kettő irányban sem éri el az 1-100 nanométer közötti tartományt. Az ilyen anyagok megnevezése a nanofilm vagy lapka. A 3D csoportba tartozó nanoanyagok esetében a térbeli kiterjedésük mindhárom irányban beleesik az 1-100 nm közötti tartományba. Ezek az anyagok csak nanokristályok kontrollált aggregálódásával tudnak létrejönni. A térbeli kiterjedés alapján való csoportosítást a 3. ábra szemlélteti [11].



3. ábra: Térbeli kiterjedés alapján való csoportosítás [12].

A harmadik ábra nagyon jól szemlélteti a nanorészecskék sokszínűségét a kiterjedésük tekintetében. A térbeli kiterjedésüknek köszönhetően a különböző nanorészecskék más-más hatást képesek elérni felhasználásuk során.

A nanoanyagokat összetételük alapján is lehetséges csoportosítani [11][13]:

- szén alapú
- szerves
 - fém
 - kerámia
 - félvezető
- szervetlen
 - polimer
 - lipid
 - kompozit

A szén alapú nanorészecskék, mint a nevéből is kiderül szén tartalmaznak fő komponensként. Ezek a nanorészecskék nem sorolhatók a szerves anyagok közé. Ide tartoznak a fullerének, a szén nanocsövek, a grafén és az ipari korom. Alakjukat tekintve három alapvető formájuk van, melyek a gömb, a lap és az üreges csövek [11][13].

A fém, kerámia és félvezető nanorészecskék a szervetlen alapú nanoanyagok csoportjába sorolhatók. A fém alapú nanorészecskék tulajdonságai nagy mértékben eltérnek a fémionok és a nagyobb méretű fémrészecskék tulajdonságaihoz képest. Ezen anyagok katalitikus tulajdonságai igencsak erősek, a különleges morfológiájuknak köszönhetően. A fém alapú

nanoanyagok a szervezetbe kerülve nagyon káros hatással lehetnek a szervezetre. Szervezetbe kerülve a reaktív oxigén gyökök a szöveti sejtekkel reakcióba lépnek és károsítják, tönkreteszik azokat. Károsodást okozhatnak a tüdőben és a szív- és érrendszert is károsíthatják. Mindazonáltal oxidatív stresszt is okozhat, mely az idő múlásával hozzájárulhat a krónikus szervi betegségekhez. Ebbe a csoportba tartoznak az átmeneti és nemesfém nanorészecskék. A kerámia nanorészecskék, fémeket nem tartalmazó szilárd szervesetlen anyagok. A félvezetőkre jellemző tulajdonság, hogy széles vezetési sávval rendelkeznek. A polimer és lipid alapú nanorészecskék, a szerves anyagok csoportjába tartoznak. Ezek az anyagok túlnyomórészt szerves anyagokat tartalmaznak. Ide sorolhatók a dendrimerek, liposzómák, polimerek és a micellák is [11][13][14].

Eredetük alapján két csoportba oszthatók a nanorészecskék, mesterséges és természetes úton létrejövő nanoanyagok csoportjára. A természetes nanoanyagok a természetben képződnek, vagy éppen élő szervezetek, antropogén tevékenysége által. Szinte bárhol megtalálhatók a Földön. Mind a szárazföldön, vizekben, kőzetekben, talajban vagy akár a légkörben is és nem kivétel az élő szervezet sem. A mesterséges nanoanyagok a különböző alakú szemcsék halmazai, melyeket szintetikus úton állítanak elő. Az előállítása előfordul mind fizika, mind kémiai úton, valamint biológiai és hibrid módon is. A motorok által kibocsátott kipufogógáz részecske kompnensei is ebbe a csoportba tartoznak [13].

4. Kísérlet folyamán felhasznált anyagok és próbatestek

Ebben a fejezetben betekintés nyerhető a felhasznált anyagok főbb jellemzőibe és a kísérletek során használt próbatestek jellegzetes tulajdonságaiba és méreteibe.

4.1. Felhasznált anyagok jellemzői

A kísérletek különféle oxidok keverékével készül, melyeknek sajátos tulajdonságait a 2. táblázat tartalmazza.

	Szemcseméret [nm]	Tisztaság	Gyártó
Y₂O₃	<50	>99%	Sigma-Aldrich
CuO	30-50	>99%	Alfa Aesar
SiO₂	10-20	>99,5%	Sigma-Aldrich
ZrO₂	15-25	>99%	Alfa Aesar

2. táblázat: Kísérlet során használt nanorészecskék tulajdonságai.

A nanorészecskék szemcseméreteit tekintve elmondható, hogy mindegyik nanorészecske szemcsemérete megfelelő és beleesik a nanotartományba, mivel mindegyik 100 nm alatti. A nanoporok minden esetben 99% feletti tisztasággal rendelkeznek.

A Group III alapolaj egy adalékmentes olaj, melyet az almásfüzitői MOL-LUB Kft. szolgáltat. Ez az olaj egyenesláncú C20-C50 szénláncú alkánok keveréke, melyet hidrokraakolás útján állítanak elő. Viszkózitási indexe 4 cSt. Mivel a nanorészecskék hatásainak vizsgálata a kutatás témája, emiatt az alapolaj nem tartalmaz semmiféle hozzáadott adalékot, ezzel kiküszöbölve annak valószínűségét, hogy az alkalmazott nanorészecskék reakcióba lépjenek a különböző adalékokkal. Ezáltal teljes mértékben a nanorészecskék hatásai mutathatók ki a kísérlet során.

4.2. Felhasznált próbatestek jellegzetes tulajdonságai és méretei

A kísérlet során használt munkadarabok szabványosított golyó, illetve tárcsa próbatestek. A szabványosított próbatestek meghatározott tulajdonságokkal rendelkeznek. A golyó 10 mm átmérőjű és anyagminősége 100Cr6 (1.3505). Emellett a szabványosított keménysége 60 ± 2 HRC és $Ra = 0,025 \pm 0,005 \mu m$ felületi érdességű. A tárcsa próbatest átmérője $24 \pm 0,5$ mm, magassága $6,9 \pm 0,1$ mm és szintén 100Cr6 (1.3505) anyagminőséggel rendelkezik. Mindemellett a szabványosított keménysége 62 ± 1 HRC és felületi érdessége pedig $Ra = 0,047 \pm 0,003 \mu m$ [15].

5. Kísérletben használt berendezések

A kísérletek során több berendezés használata is szükséges volt. A mérések a Széchenyi István Egyetem, Járműhajtás Technológia Tanszékének tribológia és felületanalízis laboratóriumaiban történtek.

5.1. Optimol SRV®5 tribométer

A belsőégésű motorok fejlesztési fázisaiban a tribométereket manapság az egyes anyagminőségi változtatások összehasonlítására használják, ezekkel költség- és időhatékonyan lehet megvizsgálni a variációs lehetőségeket egymással, vagy egy ismert referenciával is össze lehet hasonlítani. Az Optimol SRV®5 tribométert a 4. ábra szemlélteti [16].



4. ábra: Optimol SRV®5 tribométer [17].

Az SRV®5 oszcillációs tribométer a gyakorlati problémák megoldására praktikus választás. Ez a rendszer lehetővé teszi az anyagok súrlódásának és a kenőanyagok tulajdonságainak nagy pontosságú vizsgálatát. Ezen rendszer alkalmazása számos tribológiai tesztet tesz lehetővé, melyek előírt szabványok alapján végezhetők el. Mindemellett jó pár alkalmazás-specifikus ellenőrzését is lehetővé teszi. A tribométer 1-500 Hz-es frekvenciatartományban képes működni 0,01-5 mm hosszú lökettel. Az oszcilláció alapelve szerint a súrlódási együttható meghatározására van lehetőség. A mérések futhatnak valamilyen köztes közeggel, de lehetőség van köztes közeg nélküli vizsgálatra is, így elmondható az, hogy a mérések során vegyes súrlódástól a száraz súrlódásig minden megtalálható és nagyon sok lehetőséget ad a mérési típusok kiválasztásában [17].

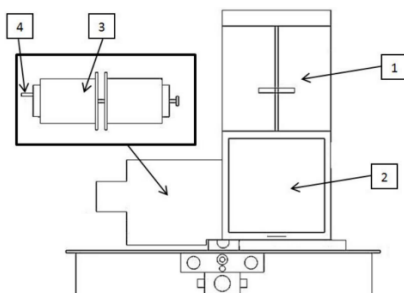
Az oszcillációs modul segítségével folyamatos és szakaszos transláció végezhető, mindez széles csúszási sebesség tartományban, amely 0,0001 m/s és 0,5 m/s közötti sebességtartományt jelent. A valóságos működés során végbemenő mozgások megfelelő szimulálása a legfőbb szempont, melyet az opcionális vezérlőfunkciók tesznek lehetővé [17].

A mérések során használt próbatestekkel válósághű érintkezési geometriák és sajátos igényű érintkezési geometriák megvalósítása lehetséges. A tribométerhez használt szabványos próbatestek széles tartománya biztosítja a tribométerrel végezhető mérések nagy választékát. Használat során az alkatrészek beszerelése nem jelent nagy problémát, mivel a tribométer kialakításának köszönhetően nem igényel előkészítő munkát és időigényessége is minimális [17].

Az Optimol SRV®5 tribométer széles konfigurációs lehetőségekkel rendelkezik, ennek

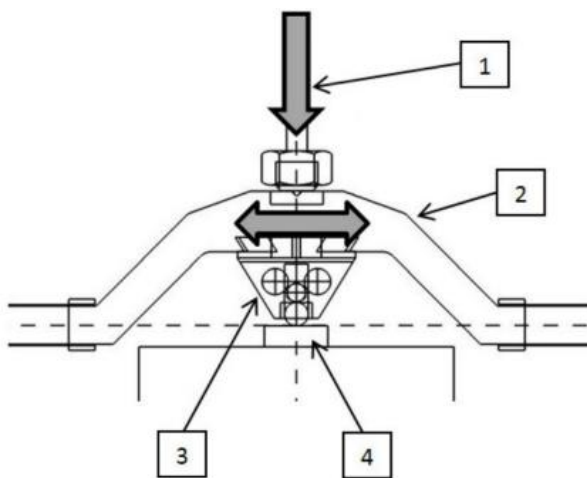
köszönhetően szintúgy, mint a próbatestek nagy választékának, a mérési lehetőségek nagyon széles kiterjedésűek. Lehetőség van alapvető oszcillációs, körforgásos, vákuumos és extrém légköri rendszer megteremtésére [17].

A szoftver kifejlesztése során az elsődleges szempont az volt, hogy a rendszerszoftver szabványos és egyedi tesztek során is használható cross-platform legyen. A szoftver alapvető feladatai közé sorolható az üzemeltetés, rendszervezérlés és a tesztértékelés. A szoftver jól kiépített rendszere miatt, lehetőség adódik a mérések során kapott eredmények rögzítésére, bemutatására, elemzésére és kiértékelésére [17]. Az Optimol SRV®5 gép felépítésének vázlatát az 5. ábra mutatja be [18]:



5. ábra: Optimol SRV®5 felépítése [18].

Az 5. ábrán egyes számmal jelölt géprész a rugós terhelési modul. Ennek segítségével adja a tribométer a terhelést a próbatestre (szabályozható). A kettes számmal jelölt géprész a tesztkamra. A különböző vizsgálatok ebben a részben zajlanak le. A hármassal jelölt rész az oszcillációs modul tekercei, melyek periodikusan változó jeleket hoznak létre. A négyes számmal jelölt rész az induktív elmozdulás érzékelő. A 6. ábra a tesztkamrán belüli részeket ismerteti, azaz az oszcillációs modult [18]:



6. ábra: Oszcillációs modul [18].

Az oszcillációs modul egyes számmal jelölt része a terhelő rúd, mely szolgáltatja a kívánt terhelést. A kettes számmal jelölt rész a trapézformát felvevő oszcilláló keret, mely alternáló mozgást végez. Ez a rész cserélhető és a terhelés átadására alkalmas. Egy 2000 N terhelést kibíró keret, nem fog olyan pontos eredményt kiadni egy olyan mérésnél, ahol csak 50 N normálerővel kell a mérést elvégezni. Tehát egy kisebb terhelést kibíró keretet kell választani, például egy 200 N normálerővel hitelesített keretet. A hármassal jelölt rész egy golyós rögzítést mutat golyóval, mely a belehelyezett golyó stabilitásáért felelős. A négyes számmal jelölt rész pedig a tesztelt tárcsa, amelyen a mérés végbemegy [18].

5.2. Keyence VHX-1000 digitális mikroszkóp

A Keyence VHX-1000 típusú mikroszkópba különböző mikroszkópok optikai tulajdonságai és vele együtt funkciói vannak integrálva. Az integrált funkciókat és tulajdonságokat a sztereoszkópok, metallurgiai- és mérőmikroszkópok szolgáltatják. Emiatt az anyagvizsgálat területén a legérdekesebb a használata, mivel gyorsan tud készíteni nagy felbontású fókuszált képeket és biológiai megfigyelésekhez használt eszközökkel is fel van szerelve. Ez a típusú mikroszkóp a legmodernebb képalkotási és mérési képességekkel rendelkezik [19]. A Keyence VHX-1000 típusú mikroszkópot a 7. ábra szemlélteti.



7. ábra: Keyence VHX-1000 típusú mikroszkóp.

5.3. Leica DCM3D konfokális mikroszkóp

A Leica DCM3D mikroszkóp a konfokális mikroszkópok közé sorolható. A mikroszkóp több funkcióval van ellátva, amely elősegíti a tágabb körben készíthető mérések lehetőségét. A mikroszkóp képes az árok mélységére és az árok szélessége mérésére, melynek segítségével képes háromdimenziós kép létrehozására, amely a mérések során kulcsfontosságú a tárcsa

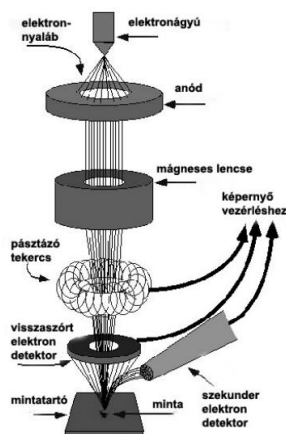
kopástérfogatának megállapításánál. A Leica DCM3D konfokális mikroszkópot teljes felületek mérésére használják, mivel 0,3 nanométernél kisebb felbontást képes elérni függőleges irányba, amely lehetővé teszi a pontosabb elemzéseket. A mikroszkóphoz tartozik egy Leica Map nevezetű szoftver, mellyel különböző elemzések és felületkarakterizálások végezhetők a metrológiai szabványok és módszereknek megfelelően [20]. A 8. ábra szemlélteti a Leica DCM3D típusú konfokális mikroszkópot.



8. ábra: Leica DCM3D típusú mikroszkóp.

5.4. Hirox SH-4000 M pásztázó elektronmikroszkóp

A Hirox SH-4000 M típusú mikroszkóp egy pásztázó elektronmikroszkóp (Scanning Electron Microscope - SEM). A SEM típusú mikroszkópok 200-300 nm-nél nagyobb felbontóképességgel rendelkező mikroszkópok, melyek a pásztázó technika elvét alkalmazzák, így egy soros, pontról pontra létrehozott képet képesek készíteni. Ezzel a technológiával meghatározhatók a kopástípusok és a felületi kifáradások is. A mikroszkóp elvi vázlatát a 9. ábra szemlélteti [21].



9. ábra: Hirox SH-4000 M elektronmikroszkóp elvi vázlata [21].

Mindemellett a mikroszkóp egy kiegészítő berendezése képes energiadiszipatív röntgenspektroszkópiát (EDX) végezni. Az EDX használatával betekintés nyerhető a munkadarabon maradt anyagok elemi összetételébe. Az így kapott eredmények támpontot nyújtanak a kopott felületen maradt nanorészecskék helyének és koncentrációjának, ezáltal pedig funkciójuk meghatározásához.

5.5. Bandelin RK 255 H ultrahangos tisztító

A kísérlet során a munkadarabok tisztasága nagyon fontos tényező, emiatt ultrahangos tisztító használata nélkülözhetetlen a mérés elvégzése során. Az ultrahangos tisztítás során az ultrahang besugárzásnak a következményeképpen kavitációs jelenség figyelhető meg, mely által a folyadékban mikroszkopikus méretű buborékok keletkeznek. Mivel a buborékok parányi méretűek így olyan helyekre is képesek beférkőzni, ahová szabad kézzel történő tisztítás során képtelenség lenne a tisztítást elvégezni. A buborékok a tisztítandó tárgy felületéhez ütköznek, így ezek a buborékok a felületen nagy energiát szabadítanak fel és így a szennyeződések leválnak a kezelt tárgy felszínéről, ezáltal a felület tisztasága megfelelő lesz. A mérések elkészítése során használt ultrahangos tisztító a 10. ábrán látható.



10. ábra: Mérések előkészítése során használt ultrahangos tisztító.

6. Kísérleti eredmények

Jelen kutatás témája a különböző felületaktívált, nanoméretű oxidkerámia keverékek tribológiai hatásainak vizsgálata Group III típusú alapolajban. Négy fő szempont szerint történt a mérések kiértékelése: integrált súrlódási együttható (FAI), súrlódási együttható (COF), golyó kopásának átmérője (WSD) és kopás térfogat (WV) értékek. Ezekkel az értékekkel teljes lefedés kapható a súrlódás és a kopás mértékéről.

A FAI és COF értékeket az Optimol SRV®5 tribométer szolgáltatja, melynek mérési programja a kísérlet során 2 óra 30 másodperces futási idővel rendelkezik. A FAI és COF értékeket a tribométer másodpercenként rögzíti, emiatt az értékeket egy Excel táblázat segítségével átlagolni szükséges a mérés vége felé közeledve. Az általam ideálisnak tűnő tartomány a mérések utolsó 5 perce, mivel a mérés elején a súrlódás megugrik a terhelés ráadás következtében és még a kenés sem megfelelő. A mérés folyamán a felületek bejáródnak és nagyjából 60 perc után kialakul rajtuk egy tribológiai határréteg, az ún. tribofilm. A tribofilm kialakulását a súrlódási együttható lassú csökkenése, majd egy adott értékre történő beállása jellemzi. A felület ezt követően alkalmas analízisre, így ezen idő elteltével kaphatók meg a reális értékek.

A WSD értékét a Keyence mikroszkóp segítségével mutatható ki, amely mikronos nagyságrendben képes a kopásnyomról képet készíteni. A WV értékének kimutatására használni szükséges egy Leica mikroszkópot, amely a kísérletben használt tárcsa kopásának árkait és csúcsait méri meg és alkot képet róla, melyet a kiértékelő rendszerében ki lehet értékelni, így megkapjuk a tárcsán létrejött kopás térfogatát. Az összehasonlíthatóság és megismételhetőség érdekében minden mérés ugyan azzal az eljárással történik.

6.1. Kísérlet folyamata

A kísérlet egymásra sorban épülő folyamatok összességéből áll, melynél bármelyik lépés elhalasztása vagy esetleges változása a mérési eredményeket befolyásolja. Emiatt fontos a folyamatok rendszerezése és sorrendbe állítása, hogy a kapott eredmények összehasonlíthatók legyenek. Az áttekinthetőség érdekében a következő alpontokban, ismertetésre kerül a kísérlet összes eleme lépésről lépésre.

6.1.1. Felületaktiválás folyamata

A kísérleti folyamat első lépése a nanorészecskék felületaktiválásának folyamata, melyet a mérés megelőző napokban szükséges elvégezni. A por állagú nanorészecskék között agglomerációk fordulhatnak elő, melyek között egy másodlagos van der Waals kötés van és ezeket a kötéseket ultrahangos tisztítóba helyezéssel fel lehet oszlatni. Egyetlen hátrány, hogy önmagában ezzel az eljárással a feloszlatott agglomerációk különálló, különböző méretű nanorészecskékre bontódnak és az olajban való elhelyezkedésük is rendszertelen lesz, így a keverék inhomogén lesz. Másrészt pedig a nagyobb nanorészecskék sokkal gyorsabban elkezdnek az olaj aljára ülepedni, így a mérések során lehetséges, hogy nem fog akkora adalékkoncentráció kerülni a mérésbe, így nem valós mérési eredményeket eredményez. Ezt

nevezik polidiszperzióknak.

Ennek az elkerülése érdekében, hogy a nanorészecskék mérete azonos legyen és a nanorészecskék az olajban egyenlő távolságban helyezkedjenek el felületaktiválás és olajhoz hozzáadott toluol szükséges, mivel a felületaktivált nanorészecskék képesek toluolban oldódni ezáltal a toluol segítségével bevihetők és homogenizálhatók az olajban. A toluol ezt követően elpárolog az olajból. Az ezen módszerrel, mérésre előkészített homogén olajkeverék monodiszperzióknak tekinthető.

A felületaktiválás során az orvosi kesztyű használata kötelező, hogy a veszélyes anyagok semmiképp se kerülhessenek a bőr felületére. A folyamathoz szükséges eszközök a következő felsorolás ismerteti:

- 99,8%-os tisztaságú etil-alkohol
- 90%-os tisztaságú olajsav
- 1 vegyszer/adalék, amellyel a felületaktiválás elvégzése történik. A példa teljes értékű áttekintése érdekében jelen esetben ittrium-oxid.
- 2 db 100 ml-es főzőpohár
- 1 db Pasteur pipetta
- 1 db műanyag pipetta
- 1 db vegyszerkanál
- 1 db mágneses keverőbaba
- 1 db mágneses keverő
- 1 db hőmérő
- 1 db hőmérőtartó
- mikromérleg
- szárítószekrény
- dörzstál és törő

Az orvosi kesztyű használata mellett nagyon fontos a biztonsági előírások betartása az esetleges szervezetre káros hatással levő anyagok szervezetbe jutásának elkerülése érdekében. A biztonsági előírások betartása mellett fontos szerepet játszik a megfelelő koncentráció és precízység a megfelelő mennyiségek kimérése miatt. A felületaktiválás kellékeit a 11. ábra szemlélteti.



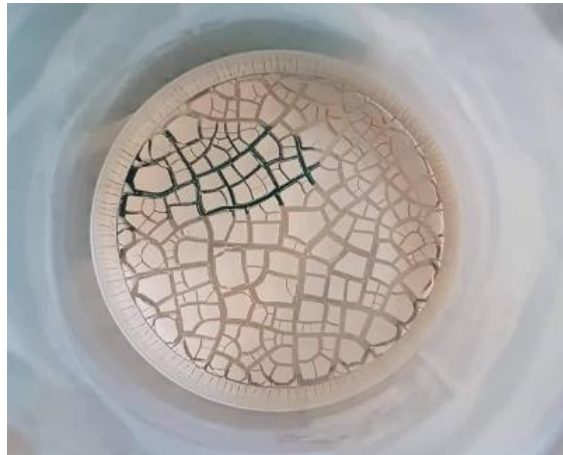
11. ábra: Felületaktiválás kellékei [22].

A mérleg beüzemelése az első lépés, hogy a felületaktiválás elvégzése megkezdődhessen. Védőréteg leemelése, majd a mérleg talpainak vizsgálata, hogy a talpak mind a négy oldalon ugyan akkora magassággal rendelkezzenek.

Felületaktiválást megszabott mennyiségek adagolása után egy kémia folyamat során lehetséges véghezvinni. A szükséges nanoadalék mennyisége - ami jelen esetben az ittrium-oxid - 0,8 g. Ezen kívül két folyadékot kell használni, amelyek az olajsav és az etil-alkohol, előbbiből 0,1 g, utóbbiból 65 g szükséges [22]. A 100 ml-es főzőpohár felhelyezésre kerül a mérlegre. Tárázás után az ittrium-oxid adagolása történik kanállal, amíg a megszabott mennyiséget nem mutatja a mérleg (0,8g). Ezt követően hozzáadják a szükséges mennyiségű olajsavat. Az eddig pohárban lévő anyagokhoz az etil-alkohol hozzáadása elengedhetetlen, mely tömege 65 g kell legyen. Miután a bekevert folyadék elkészült a hőmérséklet szabályozható keverőre kell rakni és fel kell helyezni a hőmérséklet mérőt úgy, hogy se a pohár alsó felületéhez, se az oldalfalához és a keverőbabához se érjen hozzá. A keverő 400-600 percenkénti fordulatszám között kell üzemeljen a felületaktiválás során. A hőmérséklet szabályozót be kell állítani, majd várni amíg a hőmérő 70 fokot nem mutat. Innentől 2 órán keresztül kevertetni kell, de 75 Celsius fok fölé kell melegíteni, ekkor az alkohol és az olajsav reakciójából létrejön az észter. Fontos, hogy 80 Celsius fok fölé nem mehet, mivel az észterezési reakció 70-80 °C között ideális. A hőfok szabályozására különös figyelmet kell fordítani, mivel az etil-alkohol folyamatosan párolog és közben a rendszert intenzíven hűti. Mindemellett a folyamatos párologás miatt, nélkülözhetetlen a keverési fokozat és a hőmérsékletszabályozó állítása.

A 2 óra leteltével a keverő leállításra kerül majd a keverőbaba kiszedése a következő létfontosságú lépés, majd a folyadék szárítóba tétele következik, amely 80 Celsius fokon üzemel. A felületaktiválásnak, akkor van vége, ha a szárítóba rakott anyagminta száraz és

repedezett lesz, a 12. ábra ezt szemlélteti.



12. ábra: Megfelelő szárazsággal rendelkező felületaktivált nanopor [22].

A felületaktivált anyagot kanál segítségével tároló üvegcsébe szükséges rakni. Ha a felületaktivált anyag darabos, akkor dörzstál és törő segítségével por állagúra morzsolás történik és utána lehet az üvegcsébe belerakni.

6.1.2. Olajkeverés folyamata

A kísérleti folyamat második lépése, a méréshez szükséges olajkeverék elkészítése az elgondolt nanorészecskével, melyet a mérést megelőzően 18 órával kell bekeverni, hogy a toluol teljes mértékben ki tudjon belőle párologni. Az olaj elkészítéséhez szükséges kellékeket a 13. ábra mutatja:

- Group III típusú alapolaj
- toluol
- 2 db 100 ml-es pohár
- 1 db 50 ml-es pohár
- 2 db nagyobb szájú pipetta
- 1 db vegyszerkanál
- 1 db mágneses keverőbaba
- mágneses keverő
- mikromérleg
- elszívó
- jelen esetben Y_2O_3 üvegcsében
- füzet és toll
- számológép



13. ábra: Olajkeveréshez szükséges kellékek.

Az összekevert adalékok mennyiségének kiszámítása a következőképp alakul, mely az első lépés olajkeverés szempontjából és a visszaellenőrzést segítik. A koncentrációtól függnnek a mennyiségek. Jelen esetben egy 0,2% koncentrációjú Y_2O_3 + 0,3% koncentrációjú SiO_2 olaj keverése kerül szemléltetésre. Az olaj 1000 részecskéből áll. Ha 0,2%+0,3% koncentrációval történik az olajkeverés, akkor először egy szorzó tényező szükséges, amelyet ki kell számítani. Ez úgy történik, hogy 1000-ból ki kell vonni 5-öt, mivel az adalék összkoncentrációja 0,5%-os, majd ezt kell elosztani 10-zel. Tehát $995/5 = 199$.

Következő lépés a szükséges adalék mennyiség kiszámítása, hogy pontosan hány gramm adalék szükséges az olajba összesen a két adalékot együttvéve. Egy nap 4 mérés elindítására van lehetőség és 1 méréshez a szükséges olajmennyiség 15-20 ml, így az olajnak 60-80 ml-nek kell lennie, de a mérleg grammban mér, ezért ezt grammba át kell számítani. Mivel a Group III sűrűsége $0,78 \text{ g/cm}^3$ így az olaj össztömege 46,8-62,4 g közé fog esni. Mivel 0,5%-os az összkoncentráció, így ezt az értéket (46,8-62,4 g), ha beszorzásra kerül 0,005-tel, akkor megkapható az összes adalék mennyisége az olajban.

$$46,8 \text{ g} * 0,005 \text{ és } 62,4 \text{ g} * 0,005 = 0,234 - 0,312 \text{ g}$$

A két érték közé szükséges bemérni az adalék mennyiségét. Ezután a toluol mennyiségének számítása megy végbe. Ez a következőképpen néz ki. $4 \times (\text{koncentráció} (0,5) \times 10) \times 0,5 = 4 \times 5 \times 0,5 = 10 \text{ ml}$. Mivel a mérleg grammban tud mérni, így ezt is át kell számítani grammba. A toluol sűrűsége $0,8669 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 0,8669 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$. Így $10 \text{ ml} \times 0,8669 \frac{\text{g}}{\text{ml}} = 8,669 \text{ g}$. Tehát 8,669 g toluolra van szükség jelen esetben az elkészült olajban, melyben mindkét adalék hozzáadásra került már.

Ha ez a lépés is befejeződött és a számolás sikerült, akkor az utolsó lépés a számolásban a Group III alapolaj mennyiségének a számítása. Az első lépésben kiszámolt 199-es szorzó

beszorzásra kerül a kiszámolt adalék mennyiséggel. Az így kapott érték a kellő Group III mennyiség grammban. Így megkapható, hogy $199 \times 0,234 \text{ g} - 0,312 \text{ g}$ közé kell esnie. Azaz $46,566 \text{ g} - 62,088 \text{ g}$ szükséges a hozzáadott adalék mennyiségétől függően.

Mivel az előző ismertetés, az elkészült keverékre vonatkozik és az ebbe való mennyiségek kerültek kiszámításra, így a két adalék koncentrációjával külön-külön ki kell számítani, hogy melyek a szükséges mennyiségek az olajba, hogy az előzőekben számított összekevert olajba való értékeket meg lehessen kapni.

Az Y_2O_3 mennyiségének az olajban 0,2%-ot kell kitennie, de mivel kettő keverék kerül az olajba, így ezt a mennyiséget a duplájára kell növelni, tehát 0,4%-ra. Ez amiatt szükségszerű, mert, ha csak 0,2%-kal lenne kiszámítva és hozzáöntenénk a 0,3%-kal számolt SiO_2 mennyiségeket, akkor dupla mennyiség kerülne az olajból, így a koncentráció 0,2% helyett az össz olajban 0,1%-ot tenne ki. Ebből következik, hogy a SiO_2 mennyiségét is duplájára kell növelni. Emiatt, ha három adalék kerülne összekeverésre, akkor a koncentráció értékeit a háromszorosára kellene növelni a külön-külön elvégzett számolásoknál.

Így 0,4% Y_2O_3 esetében a számolás lépései ugyan úgy történnek, ahogyan az összekevert olajnál is. A szorzótényező értéke így $\frac{(1000 - (0,4 \times 10))}{4} = 249$. Az olajba kerülő adalék mennyisége annyiban változik, hogy az olaj mennyisége a felére csökken, mivel 2 adalékot tartalmaz, ezzel együtt az adalék mennyisége is változik. Három adalék esetén ez a harmadára csökkenne. Az elkészült olaj mennyiségének 60-80 ml közé kell esnie, így ezeket az értékeket kettővel osztani szükségszerű, tehát 30-40 ml lesz az Y_2O_3 esetében az olajmennyiségünk. Így ezt az értéket átszámolva grammba megkapható, hogy 23,4 g és 31,2 g között kell lennie az olajnak. Ebből számítva a szükséges adalék mennyiség $23,4 \text{ g} - 31,2 \text{ g} \times 0,004 = 0,0936 \text{ g} - 0,1248 \text{ g}$ közötti érték. A toluol mennyiségét tekintve, 4 mérésre való mennyiség helyett 2 mérésre való mennyiségre szükséges csökkenteni, mivel 2 adalékkal történik az olajkeverés. Három adalék esetében ezt a harmadára kell csökkenteni. Ez annyiban változtatja a fentebbi képletet, hogy a 4-es szorzó helyett 2-es szorzót kell használni. Így a szükséges toluol mennyisége $2 \times (0,4 \times 10) \times 0,5 = 4 \text{ ml}$, majd ez átszámolva grammba 3,4676 g-ot jelent. A Group III alapolaj mennyiségét tekintve $249 \times 0,0936 \text{ g} - 0,1248 \text{ g}$ -ot jelent, amely 23,3064 g-31,0752 g. Ennek pontos értéke az adalék mennyiség pontos bemérése után kapható meg, de törekedni kell arra, hogy az alsó vagy a felső határ legyen bemérve, így lesznek pontosak a koncentrációk. Ugyan ez a lépéssorozat az SiO_2 esetében is megismétlendő.

Az SiO_2 -hoz tartozó kiszámolt értékek:

- Szorzótényező: $\frac{(1000 - (0,6 \times 10))}{6} = 165,666$

- Adalékmennyiség: $23,4 \text{ g} - 31,2 \text{ g} \times 0,006 = 0,1404 \text{ g} - 0,1872 \text{ g}$
- Toluol szükséglet: $2 \times (0,6 \times 10) \times 0,5 = 6 \text{ ml}$, amely $5,2014 \text{ g}$
- Group III mennyisége: $165,666 \times 0,1404 \text{ g} - 0,1872 \text{ g} = 23,26 \text{ g} - 31,012 \text{ g}$

A kiszámolt értékek után egy visszaellenőrzés következik, amely a kiszámított értékek összeadása, majd összehasonlítása a kevert olajba szükséges mennyiségekkel. Az összeadott értékek, ha egyeznek a kevert olaj értékeivel, akkor a számítás helyes.

Az egyes komponensek elkészítése megegyezik a fentebb leírtakkal, majd a komponensek elkészítése után a megfelelő arányban össze kell keverni. A számolás elvégzésének sorrendjében szükséges a mennyiségeket a keverékhez hozzáadni. Az adalék és toluol hozzáadása után, keverőbaba pohárba helyezése szükséges, hogy megfelelő módon a használt adalék nanorészecske feloldódjon. A Group III alapolaj hozzáadása után, mágneses keverőre kell helyezni a keveréket és 18 órán keresztül kevertetni kell 500-700 fordulat/perc közötti fordulatszámra. Ha ez megtörtént, akkor az bekevert olajat elszívó alá elhelyezett keverőre kell rakni biztonsági okokból. A keverést 18 órán keresztül szükséges végezni szobahőmérsékleten, hogy a toluol teljes mértékben elpárologjon [22].

Tribométeres mérés előtt az ultrahangos keverő használata kötelező a homogenitás biztosítása miatt. Mindez 50 Celsius fokon üzemeltetve 30 percen keresztül történik, majd 5 percen keresztül mágneses keverőn kevertetni kell a megfelelő homogenitás elérése miatt és ezután fecskendezhető a tribométerre felszerelt csőbe. Ez idő alatt a szemcsék a megfelelően szétoszlanak az olajban.

6.1.3. Munkadarabok használat előtti tisztítása

A próbatesteket megtisztítás előtt egyértelmű jelöléssel kell ellátni. A beazonosíthatóságot jelölések segítik. Minden egyes tárcsa egy azonosító számot kap, melyet az oldalára gravírozni szükséges. A mérések befejeztével a tárcsa és a golyó is simítózáras tasakba kerül, melyre a tárcsa számát kell feljegyezni.

A mérés előtt, ezen próbatestek megtisztítása kulcsfontosságú, hogy az esetlegesen felületen ragadt szennyeződések eltávolításra kerüljenek és a próbatestek megfelelő tisztasággal rendelkezzenek. A már fentebb említett ultrahangos tisztító segítségével ez megtehető. A tisztításhoz szükséges kettő darab 50 ml-es pohár, melybe a próbatesteket bele kell helyezni, majd féktisztítóval fel kell tölteni addig, hogy a tárcsát és a golyót is teljesen ellepje. Ezután ultrahangos tisztítóba kell helyezni, melyet 50 Celsius fokra fel kell fűteni és 5 percig üzemeltetni szükséges. Az ultrahangozás végeztével a próbatesteket a pohárból egy kisebb műanyag csipesz segítségével ki kell emelni és a felületen maradt féktisztítót sűrített levegővel

nélkülözhetetlen eltávolítani. A féktisztító teljes mértékben elpárolog a próbatestek felületéről, így semmiféle maradék nem marad a munkadarabok felületén.

6.1.4. A használt tribométer beüzemelésének folyamata

A vizsgálatok során a már említett Optimol SRV®5 tribométer szolgált a mérések véghezviteléhez. A mérések során egy folyamatos keringetésű olajrendszer lett alkalmazva, mely egy perisztaltikus pumpa segítségével tudja megvalósítani a kenési rendszert. Az effajta kenési rendszerrel a kenőolajban lévő adalékok hatásai nagyobb mértékben megfigyelhetők és segíti a keletkező hőmennyiségek elszállítását, amely a súrlódás által jön létre. Így a tribológiai rendszer a valóságoshoz közelebb kerül a belső égésű motorok alkalmazásához.

A megtisztított próbatesteket a tribométer munkaasztalára kell helyezni a kiegészítő alkatrészek segítségével, melyek egy golyós rögzítő és egy olajkád. A próbatestek kisegítő alkatrészekbe való behelyezés után, a kiegészítő alkatrészek a munkaasztalra és az oszcilláló kerethez erősíthetők, de behelyezésük kizárólag egyszerre lehetséges. A kerethez erősített pozícionáló elemet 2,5 N nagyságú nyomatékra kell húzni. Az olajkád munkaasztal felé néző oldalára egy menetes szár van rögzítve, mely a munkaasztalon lévő menetbe való behelyezését segíti elő. Ezt az elemet is 2,5 N nagyságú nyomatékra szükséges meghúzni.

A folyamatos keringetéses olajozási rendszer létrejöttéhez csövek felhelyezése is nélkülözhetetlen. A beszerelt golyós rögzítőt és olajkádát, valamint a munkadarabokat a 14. ábra szemlélteti.



14. ábra: Beszerelt golyós rögzítő, olajkád és próbatestek.

A beszerelést követi a megfelelő mérési program kiválasztása, mely jelen esetben a teljes mérés időtartama alatt 100 N terhelést, 100 Celsius fok üzemi hőmérsékletet, 50 Hz oszcillációs frekvenciát és 1 mm-es löketet jelent. A tribométer 2 óra és 30 másodpercig jár és eközben a súrlódást folyamatosan monitorozza. A kiválasztott tesztprogram elindítása után a tribométer

mérőkamrájának- és a teljes tribológiai rendszer hőmérsékletét kondicionálni kell. A kondicionálási hőmérséklet 100 Celsius fok, mivel ez megegyezik a motorolaj üzemi hőmérsékletével. Az előfeszítő 50 N terhelés ráadása közben a folyamatos keringetési rendszerben az olaj áramlása is megindul 225 ml/h áramlási sebességgel. A felmelegítési fázis végén 5 perces hőntartás következik, melynek letelte után indul az oszcilláció és maga a mérés.

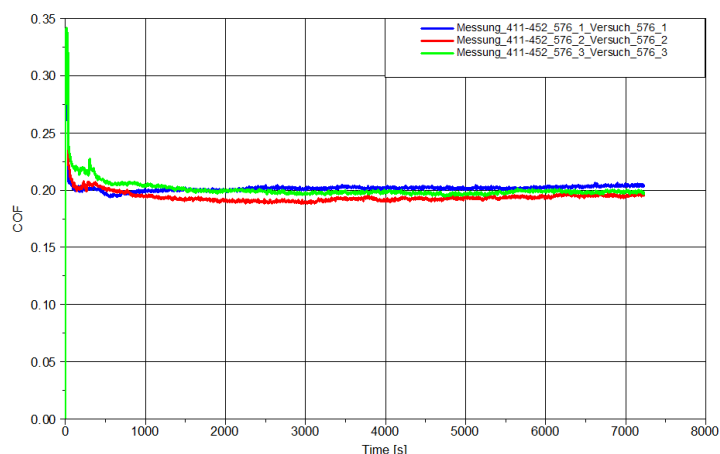
A mérés elindulása után, egy 30 másodperc bejáratási fázis következik, ahol a golyóra 50 N nagyságú terhelés hat. A következő fázis 2 órán keresztül tart, melynél a terhelés 100 N-ra lett növelve. A 2 óra 30 másodperc letelte után a gép leáll, a mérés befejeződött.

A tribométer képes az adatok gyűjtésére, feldolgozására és az adatok rögzítésére is 1 Hz-es frekvencián. Az összegyűjtött adatok alapján a tribométer képes kiszámítani és rögzíteni a súrlódási paramétereket, melyek a COF és a FAI. A COF értéke a holtpontokban kapható meg, az oszcillálás során, minden másodpercben. A FAI értéke a két holtpont közötti súrlódás értékek által leírt terület integrálásával kapható meg.

A mérések jobb beazonosíthatósága érdekében, mivel egy tárcsát többször is használatba lehet venni, mindig úgy kell behelyezni, hogy a tárcsára felgravírozott szám a beszereléskor a munkasztaltól kifelé nézzen. A következő teszt a tárcsa 90 fokos elforgatásával tud végbe menni, így egy tárcsára 4 mérési lehetőség van. A golyót figyelembe véve is 4 mérést lehet elvégezni. Ez úgy lehetséges, hogy az első mérés után a tárcsa és a golyó újbóli tisztítása előtt, a golyón keletkező kopásnyom egyik oldala mellé egy jelölést kell rakni, majd a következő 2 mérést úgy szükséges elvégezni, hogy a golyón lévő kopásnyom beszereléskor felfele néz és a pozicionáló elemhez közelebb lévő oldalon legyen a jelölés és 60 fokkal le legyen forgatva. Az utolsó mérés a középső kopásnyomtól balra essen és 60 fokkal jobbra legyen forgatva. A munkadarabokat a mérés befejeztével újból meg kell tisztítani a fentebb említett módon és a beszerelési folyamat újraindul.

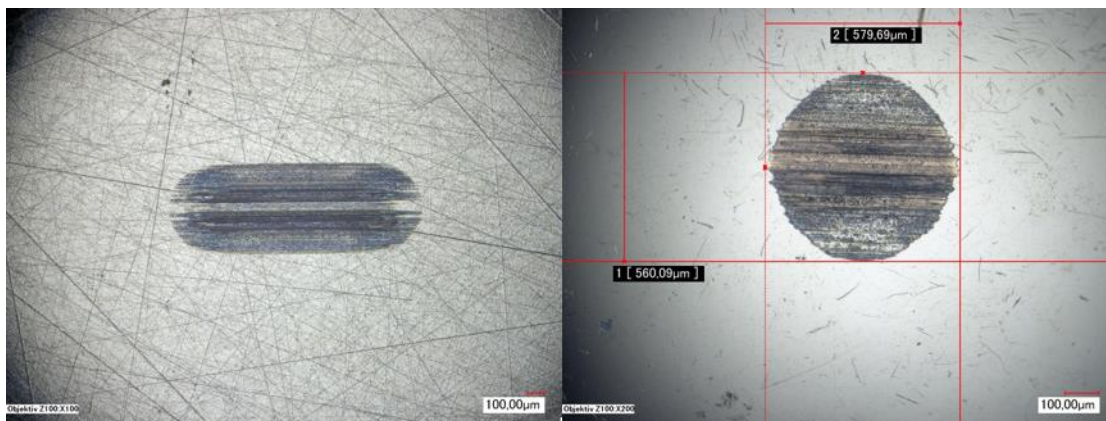
6.1.5. Mérések kiértékelésének folyamata

Minden olajkeverék 4 tribométeres méréssel lett megvizsgálva. Amint a négy mérési program lefutott a program által másodpercenkénti rögzítésből készített adatbázis lementése következik. Ez tartalmazza többek között a FAI és COF értékeket. Volt már említés arról, hogy a másodpercenkénti lefutás, valamint a teszt elején megugró súrlódás miatt az értékeket átlagolni kell a mérés végezte előtti 5 perces tartományban. Ezeket az értékeket egy összesítő Excel táblában célszerű összesíteni az átláthatóság érdekében és ezekből egy átlag értéket és szórást kell venni. Az súrlódási együttható változását az idő függvényében a 15. ábra mutatja, mely magyarázatot ad a választott másodperctartomány miértjére.



15. ábra: A súrlódási együttható változása az idő függvényében.

A golyó és a tárcsa kopásának kiterjedését a Keyence digitális optikai mikroszkóp segítségével határozták meg. A kopástérfogat meghatározásához Leica digitális, konfokális mikroszkóp lett alkalmazva. Az eredményeket egy összesített Excel táblázatban értékelték ki. A Keyence digitális optikai mikroszkóp használata során a munkadarabok tisztasága fontos szempont, mivel a nagyítások során minden felületen maradt kisebb szennyeződés, olajfolt meglátszik. A munkadarabok megfelelő minőségű felvételéhez a mikroszkóp alá helyezés előtt féktisztító segítségével ultrahangos tisztítóban távolítják el a szennyeződések, a maradék olajat a próbatestek felületéről. A féktisztító alkalmazásával teljes mértékben eltávolíthatóvá válnak a felületen maradt anyagok és nem hagy nyomot maga után, mert teljes mértékben elpárolog. A tárcsa kopásnyomairól készített Keyence felvételeke százszoros nagyításban, a golyó kopásáról készített képek kétszázszoros nagyításban készültek méretezett és méretezés nélküli formátumban. A méretezés nélküli formátumból néhány esetben már következtetések vonhatók le a kopásnyom kopástípusának megállapítására és láthatóvá válnak a kisebb felületi hibák a mérések során használt tárcsa és golyó esetében. A méretezett formátum felhasználása az összehasonlíthatóság érdekében történik, mivel a referencia méréshez képesti javulás, esetleges káros hatás mértékének felmérése a kopásnyom nagyságából is következtethető, mivel a jobb kenési tulajdonságokkal rendelkező olajoknál a felületek kevésbé kopnak el. A méretezés nélküli és a méretezett képet a 16. ábra szemlélteti.



16. ábra: A tárcsa kopása méretezés nélkül (bal) és a golyó kopása méretezéssel (jobb).

A kopásnyomok méretezése után a Leica DCM3D konfokális mikroszkóp segítségével a tárcsa kopásnyomainak vizsgálata következik. A konfokális mikroszkóp segítségével a kopásnyom térfogatának meghatározása lehetséges, egy kisegítő Leica Map nevezetű programmal. A kopásnyom vizsgálata egy EPI 20X-L típusú lencsével készültek. A tárcsa mérőasztalra helyezése után a tárcsa síkolása szükségszerű, hogy a mérés teljes pontossága biztosítva legyen, mivel a tárcsa egyenetlensége mérési hibákat vihet a rendszerbe, esetlegesen a mikroszkóp nem tudja megmérni a teljes kopásfelületet és illesztési hibákat produkálhat. A mikroszkóppal készített felvétel egy 5x4-es kisebb négyzetekből álló területen van elkészítve úgy, hogy a kopásnyom felső részének közepétől indul a felvételkedészítés és 26 μm mélységig, 30 μm magasságig vizsgálja a kopásnyomot és a sebesség hányados 1x-re van állítva. Mindemellett a képillesztés 20%-ra, a fényerő automatikusra, a felvételkedészítések száma pedig 1-re van állítva. Fontos megjegyezni azt, hogy a felvételkedészítés minden esetben ugyanazon beállításokkal kell fusson az összehasonlíthatóság érdekében.

A pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgált tárcsák tisztasága nagyon fontos, ezért a mikroszkóp használata előtt a tárcsa 15 perc féktisztítóba helyezett ultrahangos tisztítást igényel. Továbbá szükséges a felületet tisztított-sűrített levegővel megtisztítani az ultrahangozás után. Ezután a próbatest az elektronmikroszkópba helyezhető. 20 keV gyorsítófeszültséggel történtek a tárcsák mérései, 'scanning electron' (SE) módban 1000-es nagyításban történtek a felvételkedészítések. A mikroszkóphoz tartozó EDX kiegészítővel elemanalizálás lett végezve.

6.2. Kísérletet megelőző mérések

Jelen dolgozatban használt nanorészecske keverékek kiválasztását előzetes mérések előzték meg. Elsőkörben az alapolaj önmagában való vizsgálata történt meg, majd minden

egyes nanoanyag külön-külön mérésre került a bázisolajban a fent említett folyamattal. A mérési eredmények alapján lettek kiválasztva a legpozitívabb hatást kiváltó nanorészecskék és a megfelelő koncentráció mennyisége is. A figyelembe vett értékek a FAI, COF, WSD és WV értékei voltak. A legfőbb szempont a bázisolajhoz képesti összes számításba vett tulajdonság javítása volt.

A mérések időigényesek és az adalékanyagokat tekintve is költségesek, emiatt minden adalékanyaggal 4 mérés lett elvégezve, mert ezzel a mennyiséggel már lehetőség van az átlag és szórás számítására. Az adalékanyagok a mérések nagyrésztében 0,1%-os koncentrációval kezdődnek és 0,5%-os koncentrációval záródnak be, de némely mérésnél van kiegészítő koncentráció is.

Az előzetes mérésekben használt nanorészecskék a következők voltak:

- Y_2O_3 , ittrium-oxid
- CuO, réz(II)-oxid
- SiO_2 , szilícium-dioxid
- ZrO_2 , cirkónium-oxid

Az előzetes mérések elvégzése és a mérési eredmények kiértékelése után, a megfelelő nanorészecske koncentrációkat a 3. táblázat tartalmazza.

Adalék	Koncentráció
Y_2O_3	0,25%, 0,3%, 0,5%
SiO_2	0,25%, 0,3%, 0,5%
CuO	0,5%
ZrO_2	0,4%

3. táblázat: Kísérletezéshez kiválasztott nanorészecskék koncentrációi.

A kiválasztás során elsődleges szempontot képviselt, hogy a referencia mérések során kapott eredményeket az adalék minden tekintetben képesek legyenek javítani. Mivel az ittrium-oxidnak és a szilícium-oxidnak is ugyanazon koncentrációi feleltek meg az elvárt kritériumnak, így az ittrium-oxid + szilícium-dioxid ugyanazon koncentrációval rendelkező keverékei kerültek vizsgálatra. Ezenfelül a 0,5%-os Y_2O_3 keverék rendelkezett a legjobb javító tulajdonsággal, így a 0,5%-os CuO keverékkel egyben is megtörtént a vizsgálata. Az elvégzett mérések után a 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 keverék tulajdonságai nagyon jó eredményeket produkált, így kísérlet történt pluszban hozzáadott 0,4% ZrO_2 -al is, mivel előzetes kísérletek alapján, melyeknél Y_2O_3 + ZrO_2 keverék tesztelése történt a tanszéki kollégák által, jó eredményeket produkált [23].

7. Kísérleti mérések és eredményei

Az előzetes mérések alapján kiszűrésre kerültek azok a mérések, melyek a Group III alapolaj mérési értékeit felülmúlták, tehát jobb számtani értékeket mutattak. Ezek a mérési koncentrációk a FAI, COF, WSD és WV mérési eredmények tekintetében keverék formába kerülnek, melyek nagy valószínűséggel egybekeverve fokozzák a javító tulajdonságokat és jobb eredményt mutatnak. A mérések indítása és kiértékelése ugyanazon folyamattal történik, mint az előzetes kísérleteké is történt. A következő felsorolás ismerteti a választott keverékeket:

- 0% referencia (nem tartalmaz nanoadalékot)
- 0,25% Y_2O_3 + 0,25% SiO_2
- 0,5% Y_2O_3 + 0,5% SiO_2
- 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2
- 0,4% ZrO_2 + 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2
- 0,5% Y_2O_3 + 0,5% CuO

7.1. Group III bázisolajjal készített mérések

Az előzetes tesztekben 12 darab referenciamérés lett elkészítve a sima Group III bázisolajjal, melyek viszonyítási alapot adnak minden adalékkal elkészített méréshez. A 12 darab mérés a referencia érték pontos értékeinek meghatározása miatt lett elkészítve. Az összesített mérési eredményeket a 4. táblázat tartalmazza.

	Átlag	Szórás
FAI [-]	0,140	0,014
COF [-]	0,235	0,025
WSD [μm]	572,560	35,510
WV [μm^3]	985.548,33	214.587,616

4. táblázat: Group III bázisolaj referencia értékei.

7.2. 0,25% Y_2O_3 + 0,25% SiO_2 nanorészecske keverék hatása

Az első keverék mely vizsgálatra kerül a 0,25% Y_2O_3 és 0,25% SiO_2 tartalmú keverék. Az előzetes mérésekben 0,25%-os koncentrációval nem lett mérés készítve, de a 0,2% és 0,3%-os mérési eredmények számtani értékeinek eredményeiből következtetés történt, mely alapján a 0,25%-os keverék elméletben nagyobb mértékű javulást érhet el, mint a 0,2% és 0,3%-os értékek. Emiatt ez a kombináció is felhasználásra kerül. A mérési eredményeket és a referencia Group III típusú alapolaj számszerű értékeit az 5. táblázat tartalmazza.

	Group III referencia (átlag)	Szórás	0,25% Y ₂ O ₃ + 0,25%SiO ₂ (átlag)	Szórás	Százalékos eltérés a referenciához képest
FAI [-]	0,140	0,014	0,141	0,005	+1%
COF [-]	0,235	0,025	0,219	0,016	-7%
WSD [μm]	572,560	35,510	395,313	27,098	-31%
WV [μm^3]	985.548,33	214.587,616	125.273	41.382,134	-87%

5. táblázat: 0,25% Y₂O₃ + 0,25% SiO₂ keverék számtani értékei.

A vizsgálat során a kapott értékek nem teljesen egyeztek meg a feltételezett eredményekkel. A FAI értékének 1%-os növekedése figyelhető meg, mely a feltételezés alapján, miszerint a bázisolajhoz képest a keveréknek minden tulajdonságot javítania kellene, ez nem történt meg, de az eltérés annyira minimális, hogy ezt a tényezőt inkább szinten tartja, mintsem javítja vagy rontja. Ezzel ellentétben a FAI kivételével a maradék három figyelembevételi tényezőt csökkenteni tudta és a tárcsa kopásának térfogatát a vártnál sokkal jobban. Szórást tekintve megfigyelhető, hogy mind a négy szempontnál javulás látható, mely a rendszer stabilitásának javulását mutatja.

Amellett, hogy a bázisolaj tulajdonságát javítani tudta, fontos figyelembe venni az előzetes mérések eredményeit is, hogy a külön-külön felhasznált nanorészecskékhez képest javulás elérhető volt vagy sem. Mindez amiatt szükséges, mivel a nanorészecske keverékkel készített olajkeverék drágább, mint az önmagában felhasznált nanorészecskével készült keverékek. Tehát a keverék anyagi oldalról való vizsgálata is fontos szempontot képez a kutatás során. A 6. táblázat tartalmazza az Y₂O₃ 0,2%-os és 0,3%-os értékeit.

	0,2% Y ₂ O ₃ (átlag)	Szórás	Százalékos eltérés a bázisolajhoz képest	0,3% Y ₂ O ₃ (átlag)	Szórás	Százalékos eltérés a referenciához képest
FAI [-]	0,127	0,004	91%	0,116	0,003	-17%
COF [-]	0,186	0,022	79%	0,181	0,005	-23%
WSD [μm]	525,283	31,211	92%	394,283	29,097	-31%
WV [μm^3]	984.885,25	169.583,344	100%	460.297,25	191.039,335	-53%

6. táblázat: 0,2% és 0,3% Y₂O₃ olajkeverék külön mért számtani értékei.

A táblázatban látható értékek figyelembevételével elmondható, hogy a FAI és COF értékek a 0,2%-os Y₂O₃ olajkeverékhez mérten a keverék nem ért el javulást. A golyó kopásánál egy minimális eltérés figyelhető meg az átlag érték és szórás tekintetében is, de ez sem számottevő érték. Ezekkel az értékekkel ellentétben, a tárcsa kopásának térfogatánál jelentős változás következett be. A keverék nemcsak a bázisolajjal mért értéket javította 87%-kal, hanem a 0,2%-

os Y_2O_3 tartalommal rendelkező olajkeverékét is, mindemellett a 0,3%-os Y_2O_3 koncentrációjú olajat is mintegy 34%-kal. Ahhoz mérten, hogy az iparban pár százalékos csökkenés elérésre is törekvések vannak ez egy áttörő eredmény. Szórás tekintetében is nagy az eltérés az értékek között, így a keverékkel kevert olaj stabilabbnak bizonyult a tárcsa kopásának térfogata szempontjából. A 7. táblázat tartalmazza a SiO_2 0,2%-os és 0,3%-os értékeit.

	0,2% SiO_2 (átlag)	Szórás	Százalékos eltérés a bázisolajhoz képest	0,3% SiO_2 (átlag)	Szórás	Százalékos eltérés a referenciához képest
FAI [-]	0,147	0,003	105%	0,137	0,007	-3%
COF [-]	0,257	0,006	109%	0,235	0,015	0%
WSD [μm]	497,863	7,165	87%	542,303	10,752	-5%
WV [μm^3]	612.218	61.206,987	62%	401.634	140.935,068	-59%

7. táblázat: 0,2% és 0,3% SiO_2 olajkeverék külön mért számtani értékei.

A COF és FAI értékeket tekintve a 0,2% SiO_2 tartalommal rendelkező olajhoz képest a két adalékkal kevert olaj COF értéke csökkent. A 0,3% koncentrációjú SiO_2 tartalmú olajkeverékhez képest a két adalékkal rendelkező olaj a FAI értékét növelte, míg a COF értékét 7%-kal csökkentette. A golyó kopását és a tárcsa kopásának térfogatát tekintve a 0,2%-os és 0,3%-os SiO_2 tartalmú olajhoz képest, nagymértékű javulást mutat. A 0,2% és 0,3%-os SiO_2 olajhoz képest a golyó kopásának javulása 18%-ot és 26%-os, míg a tárcsa kopásának térfogata 49%-ot és 28%-ot javult. Szórás szempontjából FAI és COF eltérések minimálisak, míg a golyó kopásánál a szórás növekedése figyelhető meg és ebből a szempontból a stabilitás csökkent. Ezzel szemben a tárcsán lévő kopásnyom kopástérfogatának szórása nagymértékben csökkent, tehát a stabilitás nőtt.

A két adalék olajra gyakorolt hatásának figyelembevételével elmondható, hogy bár a külön kevert Y_2O_3 értékeit nem sikerült javítani FAI és COF tekintetében és a külön kevert SiO_2 esetében a 0,3%-os koncentrációval rendelkező olaj COF-jét tudta csak javítani, mégis a golyó kopását és a tárcsa kopásának térfogatát nagymértékben javította. Így következtetni lehet arra, hogy az olaj előállítása költségesebb és a súrlódási együtthatók javítására nem képes a külön mért adalékokhoz képest, de ez az olajkeverék a súrlódó alkatrészek élettartamának nagymértékű növelését tudja biztosítani.

7.3. 0,5% Y_2O_3 + 0,5% SiO_2 nanorészecske keverék hatása

A 0,5% Y_2O_3 + 0,5% SiO_2 tartalmú olajkeverék kapott értékeit, melyek a gép által monitorozott súrlódási együtthatók, a digitális mikroszkóp segítségével kapott golyó kopásának nagysága és a tárcsa kopásnyomának térfogati nagysága. Az adatokat a 8. táblázat tartalmazza.

	Group III referencia (átlag)	Szórás	0,5% Y ₂ O ₃ + 0,5%SiO ₂ (átlag)	Szórás	Százalékos eltérés a referenciához képest
FAI [-]	0,140	0,014	0,129	0,005	-8%
COF [-]	0,235	0,025	0,196	0,002	-17%
WSD [μm]	572,560	35,510	391,448	12,932	-32%
WV [μm ³]	985.548,33	214.587,616	62.562,75	10.795,507	-94%

8. táblázat: 0,5% Y₂O₃ + 0,5% SiO₂ keverék számtani értékei.

A táblázat értékei alapján megfigyelhető a teljes értékű javulás a bázisolajhoz képest. A két adalék hozzáadása az alapolaj tulajdonságában minden szempont tekintetében javulást mutat, mely alapján elmondható, hogy a feltételezést teljesítette. Kiemelésre méltó a tárcsa kopásának térfogatára gyakorolt hatása, mivel a bázisolajjal mért kopástérfogathoz képest 94%-ot volt képes javítani. Szórás tekintetében is egyértelmű a javulás, mivel az eredmények szórása alapján egy stabilabb rendszerrel rendelkező olaj kapható, ami azt jelenti, hogy a mérések után kapott eredmények közel azonosak. Az előzőekben már említett okokból az egy adalékkal rendelkező olajjal kapott eredményekkel is szükséges az összehasonlítás. Ezekből a mérésekből kapott eredményeket a 9. táblázat tartalmazza.

	0,5% Y ₂ O ₃ (átlag)	Szórás	Százalékos eltérés a referenciához képest
FAI [-]	0,114	0,001	-19%
COF [-]	0,169	0,006	-28%
WSD [μm]	392,733	4,801	-31%
WV [μm ³]	466.426,75	49.603,878	-53%

9. táblázat: 0,5% Y₂O₃ olajkeverék külön mért számtani értékei.

Megfigyelhető, hogy a 0,5%-os Y₂O₃ olajkeverékhez képest a FAI és COF értékek nem csökkentek, hanem FAI és COF szempontjából is 11%-os növekedés ért el. Mindemellett FAI tekintetében a szórás növekedett és a COF szórása csökkent. A golyó kopása 1%-os csökkenést ért el, így ebből a szempontból a javulás minimális, de szórás tekintetében a rendszer bizonytalanabbnak látszódik. A tárcsa kopásnyomának térfogata nagymértékű javulást ért el, mintegy 41%-ot és ezzel együtt a szórás nagysága is jelentősen csökkent, mely alapján a kopástérfogatot tekintve a rendszer biztosabb. A 0,5%-os Y₂O₃ keverékhez viszonyítva elmondható, hogy a kétadalékos olajkeverék megoszló eredményeket mutat, de a kopástérfogat nagymértékű javulása miatt a kapott eredmények jónak mondhatók, mivel a referenciához képest a javulás így is látható. A 10. táblázat tartalmazza a 0,5% SiO₂ mérések értékeiket.

	0,5% SiO ₂ (átlag)	Szórás	Százalékos eltérés a referenciához képest
FAI [-]	0,124	0,01	-12%
COF [-]	0,205	0,021	-13%
WSD [μm]	493,563	7,733	-14%
WV [μm^3]	661.051,75	32.500,284	-33%

10. táblázat: 0,5% SiO₂ olajkeverék külön mért számtani értékei.

A 0,5% SiO₂ tartalommal rendelkező olajhoz képest a két adalékkal készült olaj a FAI értékét nem volt képes csökkenteni, de a szórását tekintve az értéke javult. Ezzel ellentétben a COF értékét 4%-kal javította és a szórását minimálisra csökkentette. A golyó kopása 18%-ot javult, de a szórása növekedett. Ebből következtethető, hogy a golyó kopásának szempontjából a stabilitás csökkent az eltérő értékek miatt. A kopástérfogat értékei között az eltérés magas. Az egy adalékkal kevert olajhoz képest a változás 61%-os, amely nagyon nagy változást jelent. Emellett a tárcsa kopásnyomának térfogata a szórás tekintetében stabilabbnak mondható a két adalékkal történő méréssel.

A két adalékkal kevert olaj értékei a külön-külön kevert adalékos olajokhoz képest az értékek megoszlók. Végeredményben elmondható az, hogy a kopástérfogatot mind a bázisolajhoz, mind a külön kevert olajokhoz képest nagy értékű javulás érhető el ezzel az olajkeverékkel, ezzel is hozzásegítve alkalmazhatóságát a súrlódó alkatrészek élettartamának növelésére.

7.4. 0,3% Y₂O₃ + 0,3% SiO₂ nanorészecske keverék hatása

A harmadik több adalékkal elkészített olajkeverék, melyekkel a következő mérések futottak a 0,3% Y₂O₃ + 0,3% SiO₂-vel készített mérések. Az olajkeverékkel készített mérések eredményeit a 11. táblázatban szereplő értékek mutatják be.

	Group III referencia (átlag)	Szórás	0,3% Y ₂ O ₃ + 0,3%SiO ₂ (átlag)	Szórás	Százalékos eltérés a referenciához képest
FAI [-]	0,140	0,014	0,129	0,001	-8%
COF [-]	0,235	0,025	0,199	0,003	-16%
WSD [μm]	572,560	35,510	369,273	3,67	-36%
WV [μm^3]	985.548,33	214.587,616	67.005,233	35.928,538	-93%

11. táblázat: 0,3% Y₂O₃+0,3% SiO₂ keverék számtani értékei.

A táblázatban szereplő számtani értékek alapján a Group III alapolajjal végzett mérésekhez képest az olajkeverék minden figyelembe vett szempont alapján javította a bázisolaj

tulajdonságait. A FAI és COF értékét 8%-kal és 16%-kal volt képes csökkenteni. Az előző $Y_2O_3 + SiO_2$ mérésekhez hasonlóan nagyon nagy eltérés a bázisolajjal készített mérések és a két adalékkal rendelkező olaj között a golyó kopásánál és a tárcsa kopásnyomának térfogata között figyelhető meg. A golyó kopásának nagyságán 36%-os javulás látható, a kopástérfogaton pedig 93%-os javulás.

A rendszer stabilitását tekintve a FAI, COF és WSD értékek minimálisra csökkentek és a WV szórás értékén is szemmel látható a nagymértékű javulás, így elmondható, hogy a rendszer stabilitása javulást eredményezett. A külön mért mérésekkel való összehasonlítás érdekében a 12. táblázat tartalmazza a 0,3%-os Y_2O_3 -al mért mérések eredményeit.

	0,3% Y_2O_3 (átlag)	Szórás	Százalékos eltérés a referenciához képest
FAI [-]	0,116	0,003	-17%
COF [-]	0,181	0,005	-23%
WSD [μm]	394,283	29,097	-31%
WV [μm^3]	460.297,25	191.039,335	-53%

12. táblázat: 0,3% Y_2O_3 olajkeverék külön mért számtani értékei.

Az egy adalékkal mért mérés eredményeit összehasonlítva a két adalékkal készített olajkeverékkel mért eredményekkel, akkor elmondható, hogy a 0,3%-os Y_2O_3 keverék FAI-ra és COF-re gyakorolt hatása jobb volt, mint a 0,3% $Y_2O_3 + 0,3\%$ SiO_2 keverékkel. A 0,3%-os Y_2O_3 keverékhez képest a FAI szempontjából 9%-os növekedés, COF szempontjából 7%-os növekedés figyelhető meg. Szórás tekintetében FAI és COF szempontjából a rendszer stabilabbnak bizonyult. A golyó és a tárcsa kopása javulást mutatott, a golyó kopását tekintve 5%-ot, míg a tárcsa kopásának térfogatát tekintve 40%-ot. Mindemellett a szórás értékek is nagymértékű javulást mutatnak. A 13. táblázat tartalmazza a 0,3% SiO_2 mérések értékeit.

	0,3% SiO_2 (átlag)	Szórás	Százalékos eltérés a referenciához képest
FAI [-]	0,137	0,007	-3%
COF [-]	0,235	0,015	0%
WSD [μm]	542,3025	10,752	-5%
WV [μm^3]	401.634	140.935,068	-59%

13. táblázat: 0,3% SiO_2 olajkeverék külön mért számtani értékei.

A külön mért 0,3%-os koncentrációval rendelkező SiO_2 olajkeverék FAI és COF értékeit a 0,3%-os $Y_2O_3 + 0,3\%$ -os SiO_2 keverék határozottan javítani tudta és a két szempont

figyelembevételével a rendszer stabilabbnak mondható. A FAI értékét 5%-kal csökkentette, a COF értékét pedig 16%-kal. A FAI és COF értékeihez hasonlóan a golyó kopásáról és a tárcsa kopásának térfogatáról is elmondható a határozott csökkenés. Mindkét esetben a javulás nagymértékű volt, ami számértékekben a golyó kopását tekintve 31%-os csökkenést, kopástérfogat szempontjából 34%-os csökkenést eredményezett. Ezen kívül a szórás csökkenés is szemmel láthatóan javult, így a 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 olajkeverék által produkált eredmények alapján a rendszer stabilabbnak bizonyult.

A 0,3%-os Y_2O_3 + 0,3%-os SiO_2 olajkeverék a külön kevert Y_2O_3 -hoz képest a FAI és COF értékeket nem volt képes csökkenteni. Ezen kívül mind a bázisolajjal kapott mérések eredményeit, mind a 0,3%-os SiO_2 mérések eredményeit javította és biztosabbá tette a rendszert. A kopástérfogat 93%-os javulásával elmondható itt is, ugyan úgy ahogy az előző kettő keveréknél is, hogy ez az olajkeverék ideális lehet súrlódó alkatrészek élettartamának nagymértékű növelésének elérésére.

7.5. 0,4% ZrO_2 + 0,3% Y_2O_3 + 0,3 SiO_2 nanorészecske keverék hatása

Mivel az előző mérésekből a legjobb javító tulajdonsággal 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 tartalmú olaj szolgált, emiatt ehhez a keverékhez ZrO_2 került hozzáadásra, mivel a 0,4%-os koncentrációval rendelkező ZrO_2 egyadalékos olaj FAI és COF javító tulajdonsága nagymértékű volt és emellett a kopástérfogaton is nagymértékben javított. Ezáltal a 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 adalék FAI és COF értékeinek, esetlegesen a kopástérfogat még nagyobb csökkenésére volt törekvés. A hármas keverék számtani értékeit a 14. táblázat tartalmazza.

	Group 3 referencia (átlag)	Szórás	0,4% ZrO_2 + 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 (átlag)	Szórás	Százalékos eltérés a referenciához képest
FAI [-]	0,140	0,014	0,131	0,004	-6%
COF [-]	0,235	0,025	0,203	0,015	-14%
WSD [μm]	572,560	35,510	565,768	24,891	-1%
WV [μm^3]	985.548,33	214.587,616	792.969	114.439,877	-20%

14. táblázat: 0,4% ZrO_2 + 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 keverék számtani értékei.

A keverékről elmondható, hogy a referencia értékeket figyelembe véve a bázisolaj tulajdonságait minden tekintetben javította. Ezzel ellentétben a 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 keverékhez képest az összes szempont értékét és szórását rontotta. Még a FAI és COF értékét 2%-al, addig a golyó kopását és a tárcsa kopásnyomának térfogatát 35%-al és 73%-al. Tehát önmagában a keverék javító tulajdonsággal rendelkezik, de nem akkora mértékű a javító

tulajdonsága, mint a 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 keveréké. Mivel a kísérlet során törekvés van a költséghatékonyság elérésére is, így erről a keverékről elmondható, hogy bár javítja az alapolaj tulajdonságait, mégsem költséghatékony, mivel nem volt képes olyan eredményeket produkálni, mint az előző mérések. Ennek tekintetében az előzetes mérések értékeivel összehasonlítás nem történik.

7.6. 0,5% Y_2O_3 + 0,5% CuO nanorészecske keverék hatása

Az előzetes mérések során kapott eredmények alapján ideális keveréknek feltételezhető 0,5% Y_2O_3 + 0,5% CuO koncentrációval rendelkező olajkeverék. A keverékkel készített mérések eredményeit a 15. táblázat tartalmazza.

	Group 3 referencia (átlag)	Szórás	0,5% Y_2O_3 + 0,5%CuO (átlag)	Szórás	Százalékos eltérés a referenciához képest
FAI [-]	0,140	0,014	0,136	0,007	-3%
COF [-]	0,235	0,025	0,217	0,014	-8%
WSD [μm]	572,560	35,510	470,87	53,31	-18%
WV [μm^3]	985.548,33	214.587,616	78.478,75	24.789,615	-92%

15. táblázat: 0,5% Y_2O_3 + 0,5% CuO keverék számtani értékei.

Az olajkeverék a bázisolajhoz képest minden tekintetben javított. Nagymértékű javulás a tárcsa kopásnyomának térfogatánál látható, mely javulás százalékos értéke 92%. Szórás értelmében a golyó kopásának szórása nagyobb lett, így erre a szempontra az mondható, hogy a rendszert kis mértékben bizonytalanabbá teszi. Ezzel szemben a további szempontok szórásait javította, így a stabilitásának növekedése szembe tűnőbb, mint a csökkenése. A kopástérfogat javulása lehetővé teszi a súrlódó alkatrészek élettartamának a növelését, az olajkeverék használatával. Az előzetes mérésből kapott 0,5% Y_2O_3 értékeit a 16. táblázat tartalmazza.

	0,5% Y_2O_3 (átlag)	Szórás	Százalékos eltérés a referenciához képest
FAI [-]	0,114	0,001	-19%
COF [-]	0,169	0,006	-28%
WSD [μm]	392,733	4,801	-31%
WV [μm^3]	466.426,75	49.603,878	-53%

16. táblázat: 0,5% Y_2O_3 olajkeverék külön mért számtani értékei.

Szemmel láthatóan észrevehető, hogy a külön végzett 0,5%-os Y_2O_3 -al végzett mérés eredményeit FAI, COF és WSD tekintetében a pluszban hozzáadott 0,5% CuO adalék rontotta.

A FAI értékét 16%-kal, a COF értékét 20%-kal és a WSD értékét 13%-kal. Mindemellett a szórás értékek is romlottak. Javulás a kopástérfogatnál figyelhető meg, amely 39%-os javulást eredményezett az egyadalékos olajhoz képest és a szórásnál is javulás látható. Elmondható az, hogy bár a FAI, COF és WSD értékeknél nem figyelhető meg javulás a 0,5%-os Y_2O_3 -hoz képest, mégis a kopástérfogat nagymértékű javulása miatt az olajkeverék hasznosnak bizonyul a súrlódó alkatrészek élettartamának javítására. A 17. táblázat tartalmazza a 0,5% CuO mérésekből származó értékeket.

	0,5% CuO (átlag)	Szórás	Százalékos eltérés a referenciához képest
FAI [-]	0,113	0,003	-19%
COF [-]	0,164	0,009	-30%
WSD [μm]	478,6075	19,949	-16%
WV [μm^3]	941.872	242.996,625	-4%

17. táblázat: 0,5% CuO olajkeverék külön mért számtani értékei.

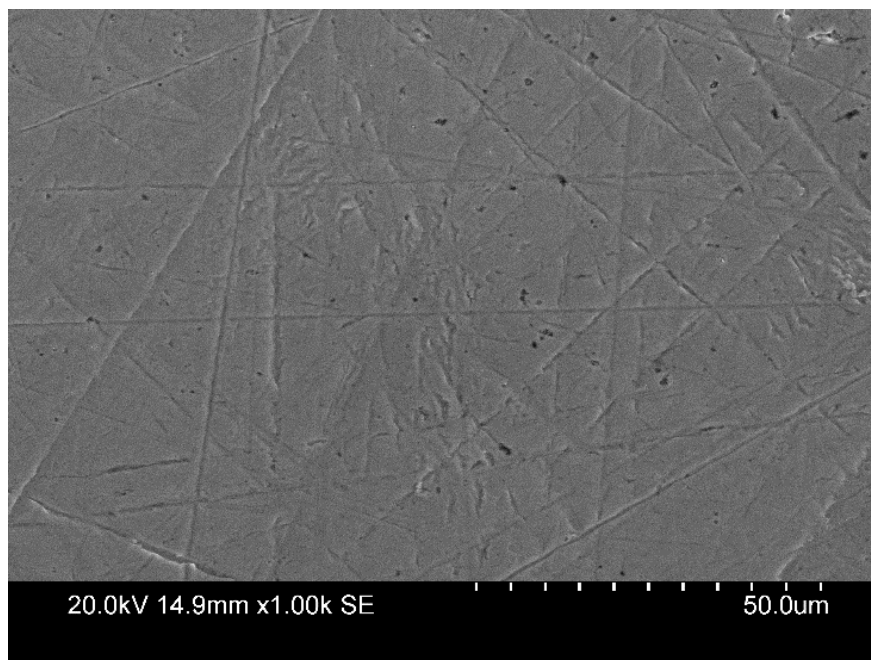
A FAI és COF eredményeit tekintve mindkettőnél magasabb értékeket eredményezett a 0,5% Y_2O_3 + 0,5% CuO olajkeverék a 0,5%-os CuO keverékhez képest és a szórásuk is növekedni látszik. A WSD értékét sikerült 2%-kal csökkenteni, de a szórás nagymértékben növekedett. A WV értéke 88%-os javulást mutat, amely egy nagyon nagymértékű javulás, mindemellett a szórás értéke is nagy változást eredményezett.

FAI és COF tekintetében a változás növekvő tendenciát mutatott, így a keverék a kevesebb károsanyag kibocsátás érdekében nem felhasználható, ezzel szemben a nagymértékű kopástérfogat változás miatt a súrlódó alkatrészek élettartamának növelésére alkalmazható, mivel mind a két külön kevert adalékos olajhoz képest számottevő a javulás értéke. Költségekben drágább, mint a külön-külön kevert olajok, de a százalékos értékekből kifolyólag eredményesebb lehet az élettartam növelését tekintve.

7.7. Tárcsák kopástípusainak meghatározása

A teljes értékű kiértékeléshez tartozik a tárcsák kopástípusainak vizsgálata, mellyel betekintés kapható a kopásnyomon belüli kopástípusokba. A kísérlet során minden adalékkal négy mérés készül, de csak egy kopásnyom bemutatására kerül sor, amely mind a négy kopásnyomra jellemző tulajdonságokat tartalmazza. Felvételek készülnek a kopásnyom közepéről, mivel a hidrodinamikai kenése itt a legjobb az olajnak és kép készül a holtpontnál, mivel a kenési hatások itt a leggyengébbek. Ezek a felvételek 1000x-es nagyításban készülnek.

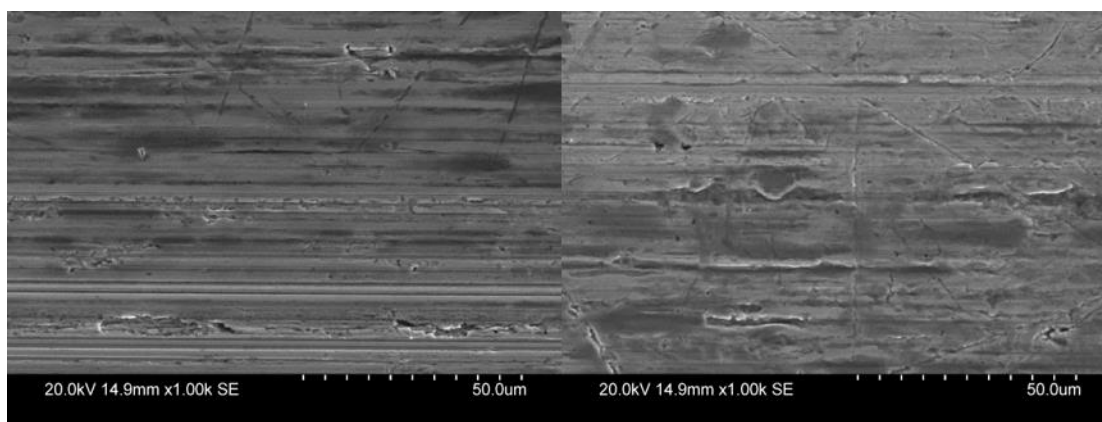
Viszonyítási alap tekintetében a 17. ábra tartalmazza a tárcsa járatlan felületét 1000x-es nagyításban, mely referenciaként szolgál.



17. ábra: Tárcsa járatlan felületének 1000x-es elektronmikroszkópos nagyítása.

7.7.1. 0,25% Y_2O_3 + 0,25% SiO_2 tartalmú keverékhez tartozó kopásnyom kopástípusainak meghatározása

A kopástípusok megállapítására a következő ábra szolgál segítségül, mely a kopásnyom közepéről (WT) készült, mivel a relatív sebesség itt a legnagyobb, így a legtöbb hatást az olaj itt fejt ki. A holtponthoz (DC) – ahol a golyó sebessége 0 volt – készített kép vizsgálata is szükséges, mivel a leggyengébb kenési tulajdonságok a mérés során ebben a pontban vannak, így a 2 pontban készített felvételeket a 18. ábra tartalmazza.



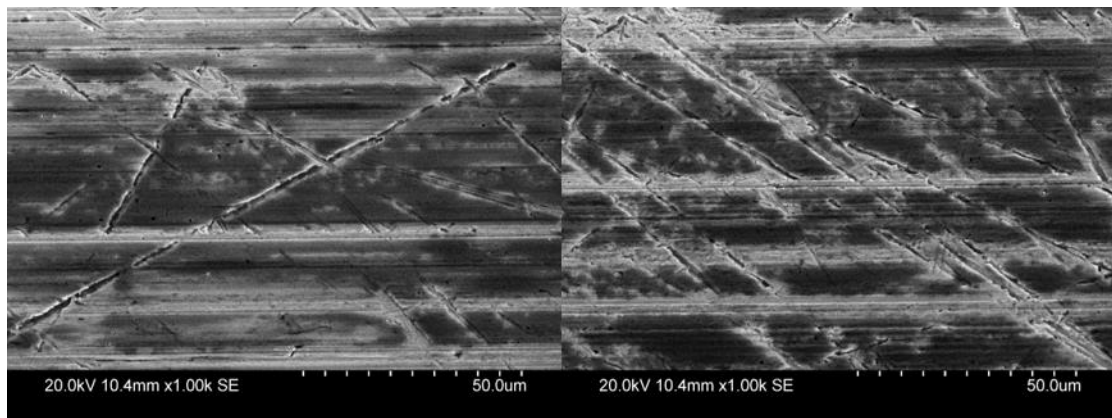
18. ábra: 0,25% Y_2O_3 + 0,25% SiO_2 kopásnyom WT (bal) és DC (jobb) képe.

A 0,25% Y_2O_3 + 0,25% SiO_2 keverékkel készített mérések kopásnyomának képéből

megállapítható, hogy a kopásnyom felületén abrazív és fáradásos kopások láthatók. A kopásnyomban láthatók az eredeti felület érdességi árkai, mivel a nem vízszintes irányban húzódó nyomok, mind az eredeti felülethez tartozó megmunkálás során létrejött érdességi árkok. Ebből önmagában is megállítható a kísérleti eredmények nélkül, hogy az olajkeverék a felületet minimális mértékben koptatja el. A felvételen láthatók néhány pontban fekete foltok, melyek vagy olajráégések, vagy esetlegesen egy védőréteg kialakulása a felületen. Erről pontosabb kép az anyagösszetétel megállapításakor kapható. A holtpontban is láthatók fáradásos kopás típusok és emellett, adhéziós kopás is látható. Ebben a pontban is jól láthatók az eredeti felület érdességi árkai, így itt sem kopott jobban a tárcsa, mint a tárcsa közepén. Mindemellett a kisebb ráégési foltok is megfigyelhetők vagy az esetlegesen létrejövő felületvédő réteg.

7.7.2. 0,5% Y_2O_3 + 0,5% SiO_2 tartalmú keverékhez tartozó kopásnyom kopástípusainak meghatározása

A 19. ábra tartalmazza a kopásnyom közepéről és holtpontjáról készített 1000x-es nagyítású felvételeket.



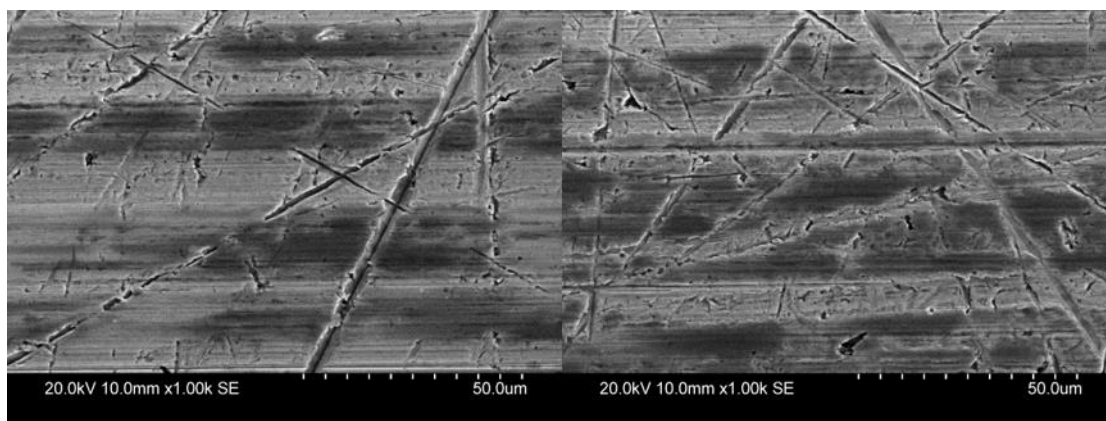
19. ábra: 0,5% Y_2O_3 + 0,5% SiO_2 kopásnyom WT (bal) és DC (jobb) felvétele.

A kopásképen jól láthatók az abrazív kopásnyomok. Mindemelett ennél az olajkeveréknél is megfigyelhető, hogy a kopásnyomban megjelennek az eredeti felülethez tartozó megmunkálás során létrejött érdességi árkok, melyek szemmel láthatóan alig koptak el, így arra lehet következtetni, hogy ez az olajtípus is a tárcsa elkopását nagymértékben gátolja. Mindemellett az árkok olajvezetésre kitűnően alkalmasak. Megjelennek itt is feketébb részek a felületen, melyek olajráégések vagy egy védőréteg képződmény.

A holtpontban készített felvételen is ugyan az látható, mint a kopásnyom közepén készített felvételen, esetlegesen az olajráégés vagy védőréteg nagyobb mértékű megjelenése.

7.7.3. 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 tartalmú keverékhez tartozó kopásnyom kopástípusainak meghatározása

A 20. ábra tartalmazza a kopásnyom közepéről és holtpontjáról készített 1000x-es nagyítású felvételeket.

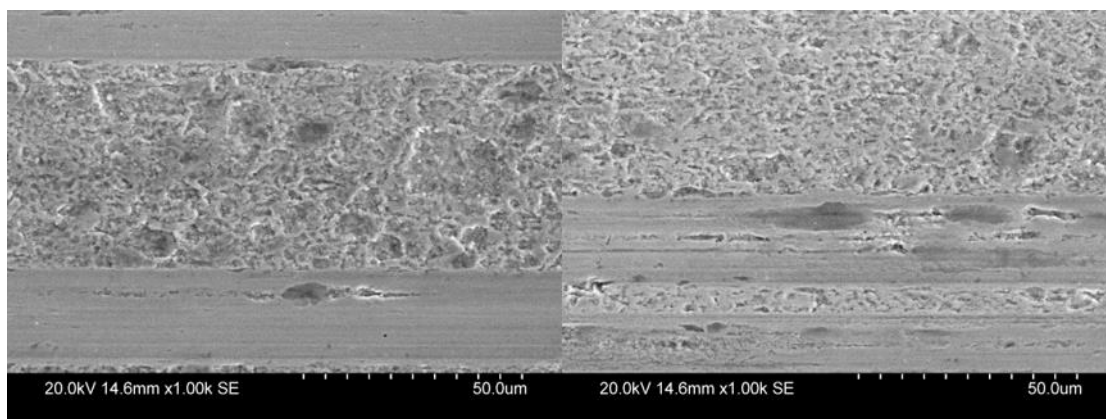


20. ábra: 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 kopásnyom WT (bal) és DC (jobb) felvétele.

A kopásnyom közepén nem tűntek el a felületi érdesség árkai, így ennél az olajkeveréknél is megállapítható a jó kopáscsökkentő tulajdonságok. Emellett a felületi érdesség árkaiban kisebb anyagbehajlások vannak, melyek a plasztikus deformáció jeleit mutatja. A plasztikus deformáció jelenségéről, ezzel együtt pedig az ittria nanoadalék működéséről szóló cikket a Tanszék oktató kollégái már publikálták [24]. A felület rendelkezik abrazív és fáradásos kopásnyomokkal. A holtpont felvétele ugyanazon eredményeket szolgáltatva.

7.7.4. 0,4% ZrO_2 + 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 tartalmú keverékhez tartozó kopásnyom kopástípusainak meghatározása

A 21. ábra tartalmazza a kopásnyom közepéről és holtpontjáról készített 1000x-es nagyítású felvételeket.

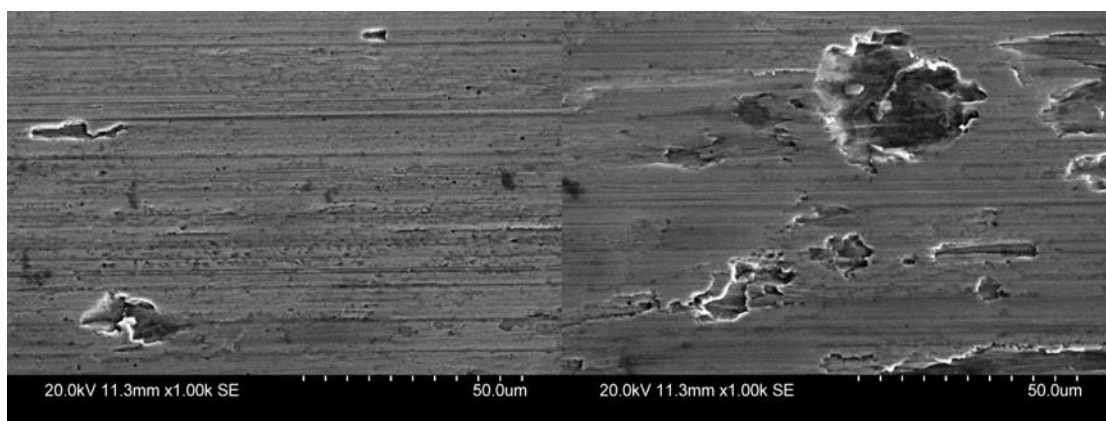


21. ábra: 0,4% ZrO_2 + 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 kopásnyom WT (bal) és DC (jobb) felvétele.

A kopásnyom közepén és holtpontján készített felvételek, ugyanazon információt hordozzák magukban. Nagymértékű abrazív és oxidációs kopásnyomok figyelhetők meg a felületen. A kopásnyomban az érdességi árkok nem láthatók, így az előző mérésekhez képest ez a keverék jobban koptatja a felületet.

7.7.5. 0,5% Y_2O_3 + 0,5% CuO tartalmú keverékhez tartozó kopásnyom kopástípusainak meghatározása

A 22. ábra tartalmazza a kopásnyom közepéről és holtpontjáról készített 1000x-es nagyítású felvételeket.

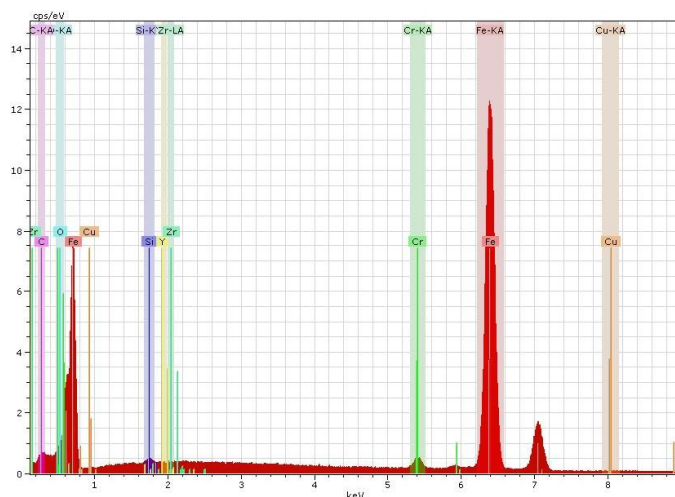


22. ábra: 0,5% Y_2O_3 + 0,5% CuO kopásnyom WT (bal) és DC (jobb) felvétele.

Mindkét felvételen látható az abrazív és fáradásos kopásra jellemző tulajdonságok. A kopásnyom közepén a fáradásos kopások kisebb mértékűek, ezzel ellentétben a holtpontban erőteljesebbek. Ebből kifolyólag arra lehet következtetni, hogy a kopásnyom holtpontjában a kenési tulajdonságok gyengék voltak, és a kopásnyom holtpontjában a tárcsa nagyobb igénybevételnek volt kitéve.

7.8. Kopásfelületek összetételének vizsgálata

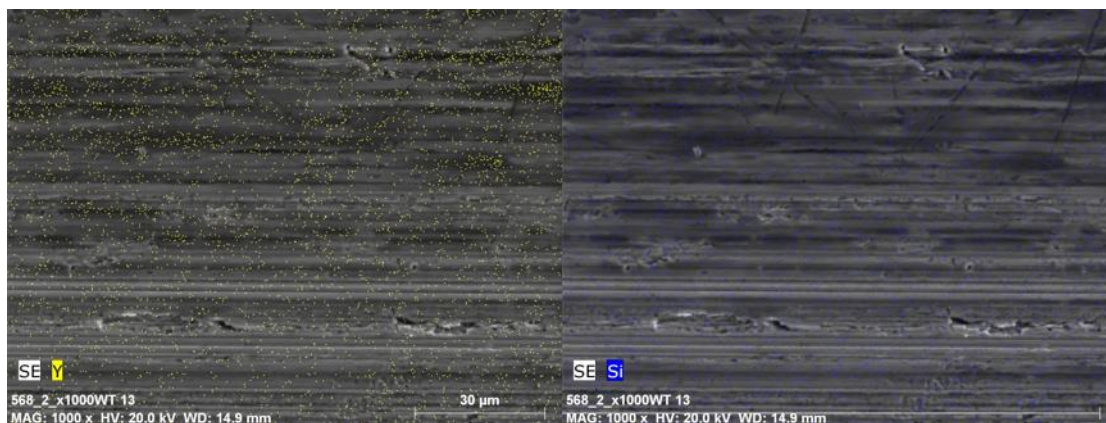
A teljes értékű kiértékeléshez tartozik a tárcsák kopástípusainak meghatározásán kívül a kopásfelületek összetételének vizsgálata is. Így betekintés kapható abba, hogy a kopásnyom milyen anyagokat tartalmaz, mekkora mennyiségben és milyen területeken. A csúcsok jelzik az adott területen lévő anyagok mennyiségi előfordulását. Ezáltal különböző következtetések vonhatók le az elvégzett mérésekből a SEM által készített felvételekkel összevetve, mint például, hogy a felületen esetleges védőréteg kialakulásának lehetősége merült fel, vagy szimplán az olaj ráégése történt a próbatestre. A csúcsok relatív magasságából lehet következtetni az anyagi összetételre és arányára. A 23. ábra szemlélteti a tárcsa járatlan felületének EDX spektrumát.



23. ábra: Tárcsa járatlan felületének EDX spektruma.

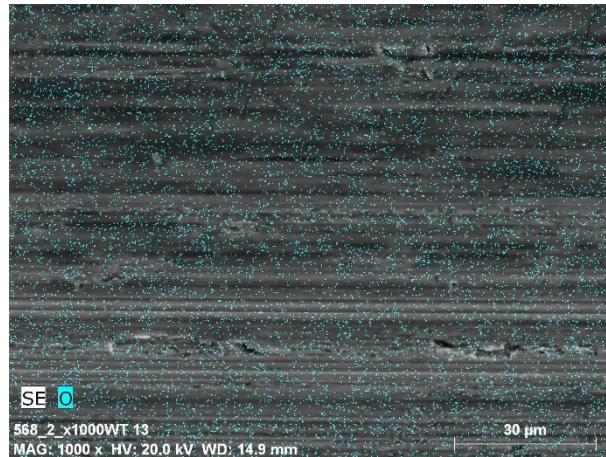
7.8.1. 0,25% Y_2O_3 + 0,25% SiO_2 tartalmú keverékhez tartozó kopásnyom felületi összetételének vizsgálata

A 0,25% Y_2O_3 + 0,25% SiO_2 esetben elmondható az, hogy a sötétebb felületeken nagyobb mértékű ittrium maradt a felületen, de ezzel ellentétben szilícium és oxigén tartalma, majdnem teljesen homogén, bár a szilícium eloszlását nehéz megállapítani, mivel a tárcsa önmagában is tartalmaz szilíciumot. Ebből kifolyólag a sötétebb részekben egy bizonyos védőréteg alakult ki az anyagok egymással való reakcióba lépése során a felületen, amely megakadályozza a tárcsa kopását. Az ittrium és szilícium eloszlását mutató felvételeket a 24. ábra tartalmazza.



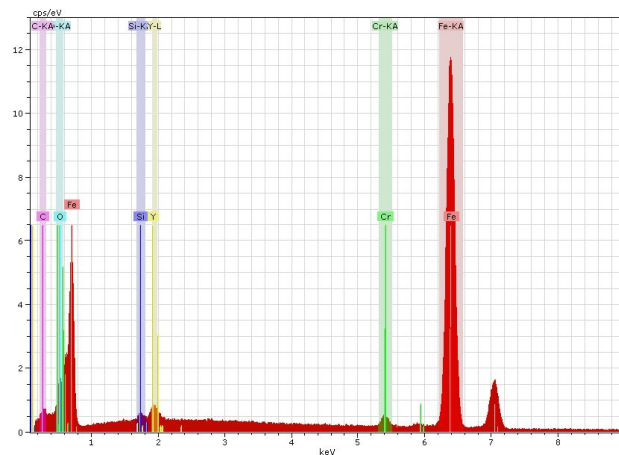
24. ábra: 0,25% Y_2O_3 + 0,25% SiO_2 kopásnyom közepének/holtpontjának ittrium (bal) és szilícium (jobb) eloszlása.

Érdeemes megfigyelni azt is, hogy mivel Y_2O_3 és SiO_2 adalékkal készült a mérés, emiatt az oxigén tartalomnak is nagyobbnak kellene lennie ott, ahol az ittrium tartalom többnek mutatkozik, de ez nem figyelhető meg, az oxigén tartalom teljesen homogén. Az oxigén tartalom eloszlása a 25. ábrán látható.



25. ábra: 0,25% Y_2O_3 + 0,25% SiO_2 kopásnyom közepének/ holtpontjának oxigén eloszlása.

Anyagi összetételt tekintve az ittrium és oxigén tartalom növekedett, a többi érték pedig referencia érték közelében maradt. A 26. ábra szemlélteti az anyagi összetételt.

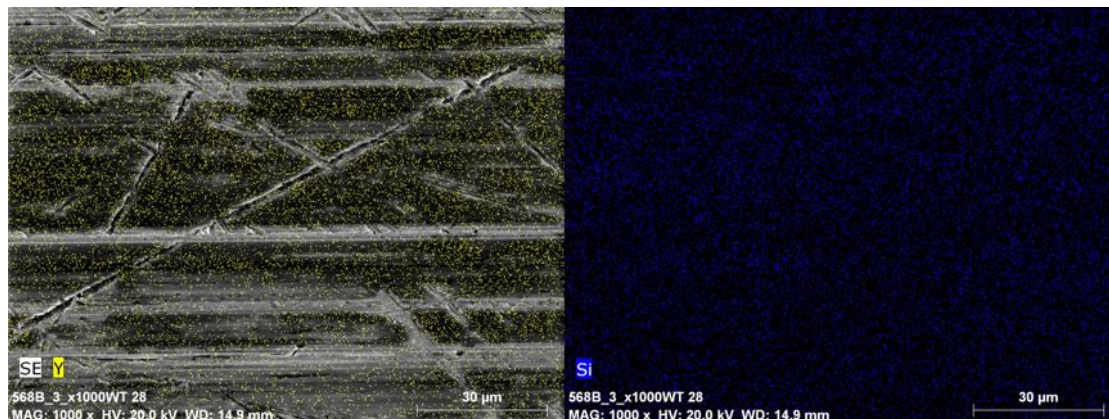


26. ábra: 0,25% Y_2O_3 + 0,25% SiO_2 kopásnyom közepének/holtpontjának EDX spektruma.

7.8.2. 0,5% Y_2O_3 + 0,5% SiO_2 tartalmú keverékhez tartozó kopásnyom felületi összetételének vizsgálata

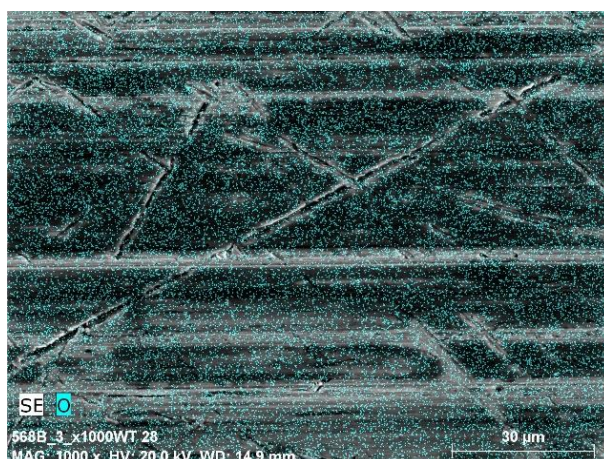
A 0,5% Y_2O_3 + 0,5% SiO_2 keverék által készített mérés kopásnyomának ittrium tartalma, az előző méréshez képest sokkal nagyobb. Egyértelműen kivehető, hogy a fekete foltokban az ittrium tartalom jóval több, mint a környező területeken, így ebben az esetben is elmondható, hogy az olajkeverék egy bizonyos védőréteget hozott létre, amely a felületet védi a kopástól. A kopásnyomban a referencia és az előző méréshez mérten is megfigyelhető az ittrium tartalom növekedése. Így elmondhatóvá válik, hogy ezen olajkeverékek használata során a felületen maradt ittrium tartalom a koncentráció növekedésével arányosan nő és ezzel együtt a felületvédő réteg eloszlása is növekedést mutat. A szilícium és oxigén tartalom ebben az esetben sem volt nagyobb a foltok területén, hanem teljesen homogén állapotot vett fel a mért területen,

de a kopásnyom szilícium és oxigén tartalma növekedett a referenciához képest. Ebből arra lehet következtetni, hogy valamiféle kémiai reakció játszódhat le a mérési folyamat során. A 27. ábra mutatja az ittrium és szilícium eloszlását, melynél a szilícium fekete hátteret kapott, mivel más formátumban az eloszlás mértéke nem vehető ki teljes mértékben.



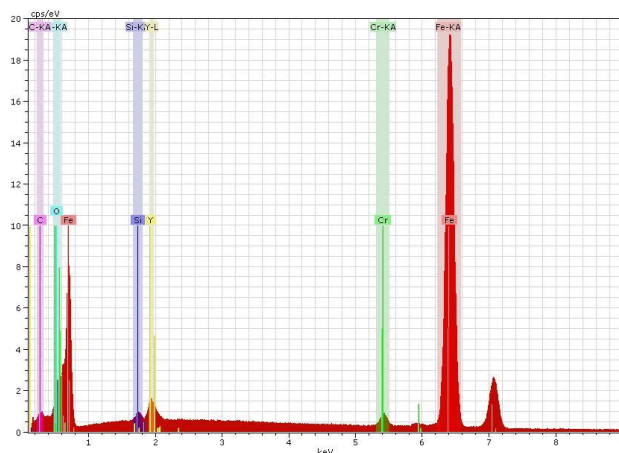
27. ábra: 0,5% Y_2O_3 + 0,5% SiO_2 kopásnyom közepének/holtpontjának ittrium (bal) és szilícium (jobb) eloszlása.

Az oxigén tartalmat tekintve szintúgy, mint az előző mérésnél, mivel oxidokról beszélünk, azokon a területeken ahol az ittrium nagyobb mennyiségben fordul elő, az oxigénnek is nagyobb mennyiségben kellene előfordulnia. Ebből is következtetést lehet levonni, arra nézve, hogy a mérési folyamat során egy esetleges kémiai reakció mehetett végbe. A 28. ábra szemlélteti, hogy ez itt sem történt meg, de az oxigén mennyisége növekedett a mért területen.



28. ábra: 0,5% Y_2O_3 + 0,5% SiO_2 kopásnyom közepének/holtpontjának oxigén eloszlása.

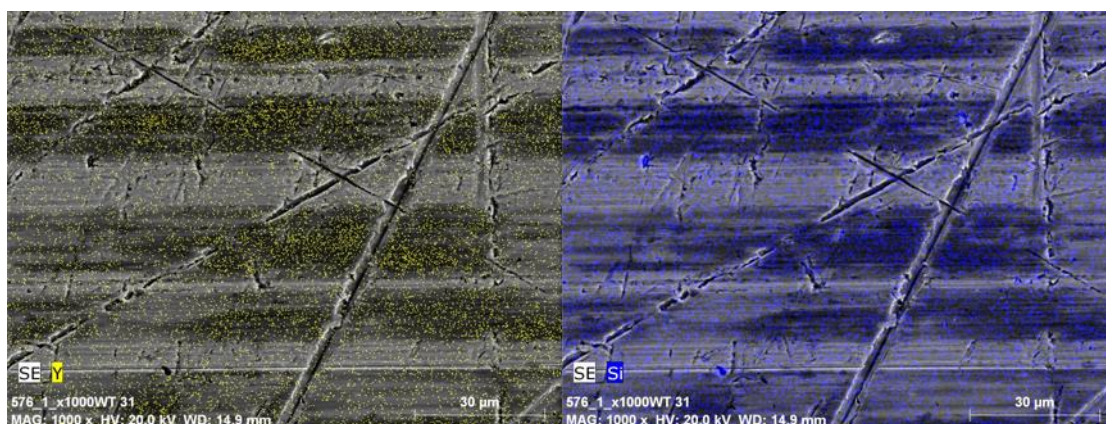
Az anyagi összetétel szemléltetésére az 29. ábra szolgál, melyen jól kivehető a referenciához és az előző 0,25% Y_2O_3 + 0,5% SiO_2 keverékhez képesti ittrium, szilícium és oxigén növekedése.



29. ábra: 0,5% Y_2O_3 + 0,5% SiO_2 kopásnyom közepének/holtpontjában EDX spektruma.

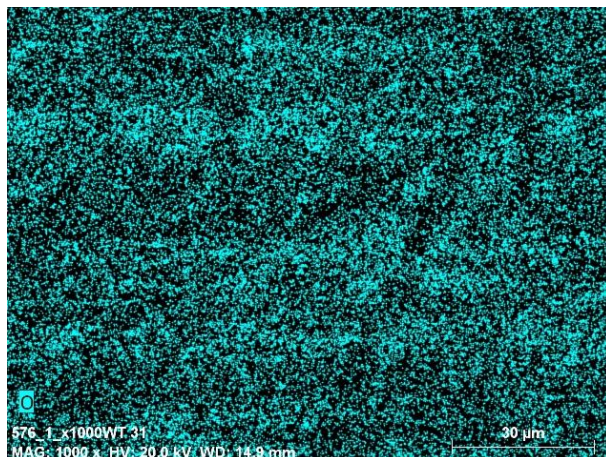
7.8.3. 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 tartalmú keverékhez tartozó kopásnyom felületi összetételének vizsgálata

Szintúgy, mint az előző 2 keverékkel készített mérésnél, ennél a kopásnyomnál is megfigyelhető az ittrium mennyiségének növekedése. Mindemellett látható az ittrium tömörülése a fekete foltok területén, de a koncentráció növelésével a létrehozott védőréteg egyre nagyobb területet foglal el és az ittrium, szilícium és oxigén mennyisége is növekedik. Ebből kifolyólag ennél a keveréknél a védőréteg nagysága, nem akkora mértékű, mint a 0,5% Y_2O_3 + 0,5% SiO_2 keveréknél. A szilícium és oxigén mennyiségét tekintve, itt is növekedés látható a referenciához képest és a szilícium eloszlása ennél a keveréknél is homogén, és nem figyelhető meg egybetömörülés a védőréteg területén. A SiO_2 ötvözője a tárcsa anyagának, de acéllal való ötvözés során nagyobb kristályokat alkot, melynek fázishatára feszültséggyűjtő pont. Mérések során, ha ez közel van a felszínhez, akkor az acél felszakad és látni alatta a nagyobb mennyiségű szilíciumot. A 30 ábra tartalmazza az ittrium és szilícium eloszlását.



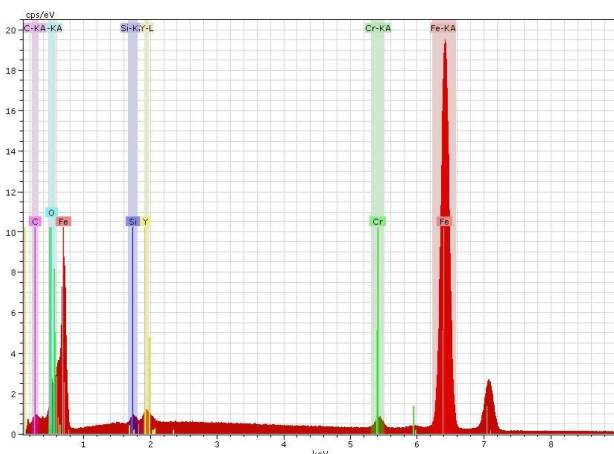
30. ábra: 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 kopásnyom közepének/holtpontjának ittrium (bal) és szilícium (jobb) eloszlása.

Oxigén tartalmát tekintve a kopásnyomról azt lehet elmondani, hogy az előző két méréssel ellentétben ebben az esetben a nagyobb ittrium tartalmú felületeknél az oxigén tartalom is nőtt. Ezt a 31. ábra szemlélteti, de a jobb átláthatóság érdekében az eloszlás ábrája fekete háttérrel kapott.



31. ábra: 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 kopásnyom közepének/holtpontjának oxigén eloszlása.

Az anyagi összetétel szemléltetésére a 32. ábra szolgál, melyen látható a referenciához képesti ittrium, szilícium és oxigén koncentráció növekedés.

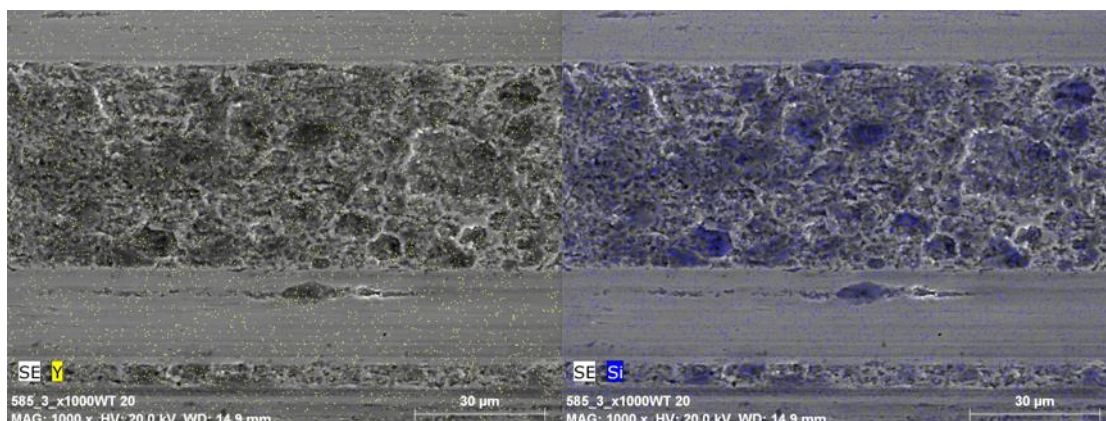


32. ábra: 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 kopásnyom közepének/holtpontjának EDX spektruma.

7.8.4. 0,4% ZrO_2 + 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 tartalmú keverékhez tartozó kopásnyom felületi összetételének vizsgálata

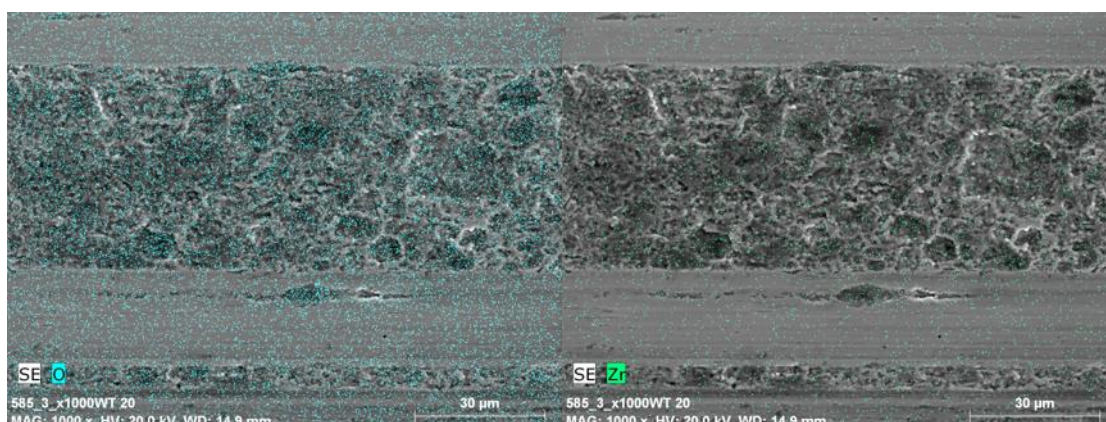
A 0,3% Y_2O_3 + SiO_2 adalékkal történő méréshez képest a hozzáadott 0,4% ZrO_2 hozzáadása a kopásnyom összetételét és a tömörüléseket megváltoztatta. ZrO_2 tekintetében a kopásnyom összetételében egyértelmű a változás, de a kopásnyom egész területén az eloszlása teljes mértékben homogén állapotot vett fel. Mindemellett, még a 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 keveréknél elemzett kopásnyomon az ittrium tartalom egyértelmű növekedést mutatott és a

szilícium tartalom is kis mértékben nőtt, ezzel ellentétben a hozzáadott ZrO_2 hatására az ittrium nem mutatott növekedést, csak alapzaj formájában található meg a felületen és az eloszlása is homogén formájú. A szilícium pedig az oxidációs kopásnyom területén egyértelmű dúsulást és tömörülést mutat. Ezen a kopásnyomon létrehozott védőréteg nem látható. A 33. ábra az ittrium és szilícium eloszlását mutatja a kopásnyomban.



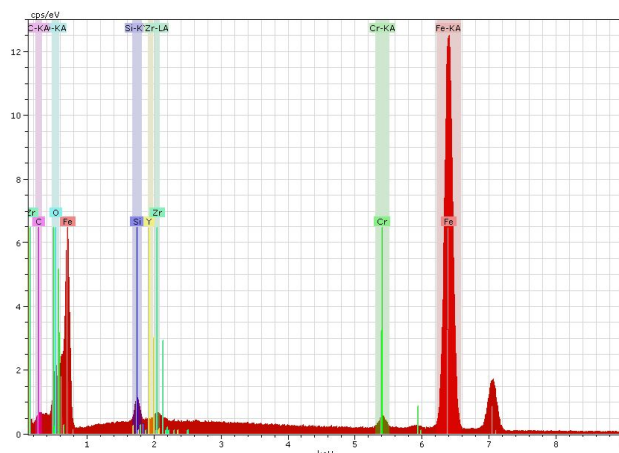
33. ábra: $0,4\% \text{ZrO}_2 + 0,3\% \text{Y}_2\text{O}_3 + 0,3\% \text{SiO}_2$ kopásnyom közepének/holtpontjának ittrium (bal) és szilícium (jobb) eloszlása.

Az előbbieken már szó esett arról, hogy a cirkónium hozzáadásával az ittrium csak alapzaj formájában található meg a felületen. Ebből arra lehet következtetni, hogy a cirkónium az ittriumot, majdnem teljes mértékben eltávolította a felületről, de ezzel szemben a szilícium mennyisége sokkal többnek mutatkozik, mint a $0,3\% \text{Y}_2\text{O}_3 + 0,3\% \text{SiO}_2$ keverék kopásnyomában volt megtalálható. A cirkónium hozzásegítette a szilíciumot a felületen való megtapadáshoz az oxidációs területeken és dúsulás látható oxigén tekintetében is ugyanazon területeken. A cirkónium a kopásnyomban homogén eloszlást mutat. A 34. ábra az oxigén és cirkónium eloszlását mutatja a kopásnyom területén.



34. ábra: $0,4\% \text{ZrO}_2 + 0,3\% \text{Y}_2\text{O}_3 + 0,3\% \text{SiO}_2$ kopásnyom közepének/holtpontjának oxigén (bal) és cirkónium (jobb) eloszlása.

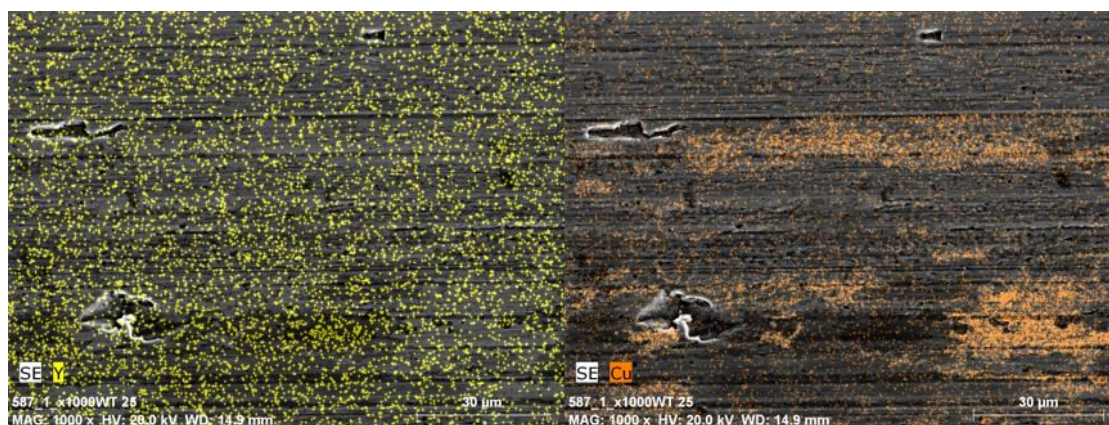
Az anyagi összetétel szemléltetésére a 35. ábra szolgál, melyen látható, hogy az ittrium csak alapzajként jelenik meg és a szilícium növekedése és az oxigén tartalom csökkenése a 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 keverék kopásnyomához képest.



35. ábra: 0,4% ZrO_2 + 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 kopásnyom közepének/holtpontjának EDX spektruma.

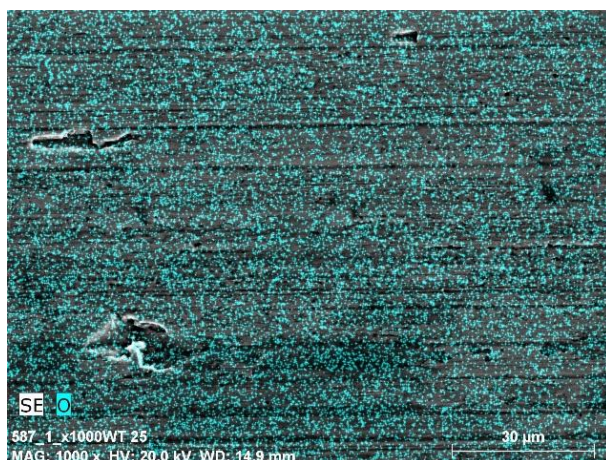
7.8.5. 0,5% Y_2O_3 + 0,5% CuO tartalmú keverékhez tartozó kopásnyom felületi összetételének vizsgálata

A 0,5% Y_2O_3 + 0,5% CuO keverék kopásnyomának közepén készített felvételek alapján elmondható, hogy ittrium tartalom szempontjából a felületen homogén formában található meg. A réz tartalom tekintetében a kopásnyom bizonyos területein a réz egybetömörülése figyelhető meg, de oxigén egybetömörülés nem látható. Ilyen esetet már elemeztek az utóbbi időkben a Tanszék kollégái és azt lehet elmondani, hogy a réz elemi rézzé és oxidálódott réz(I)-oxiddá alakult át oxigénredukció útján. A felületen nem látszódnak fekete foltok, mint az ittrium + szilícium keverék esetében, de a felületen elemi rézréteg képződik, amely kitűnő súrlódási tulajdonságai miatt jelentősen csökkenti a felületen mérhető súrlódási együttható nagyságát [25]. A 36. ábra mutatja az ittrium és réz eloszlását a kopásnyom közepén.



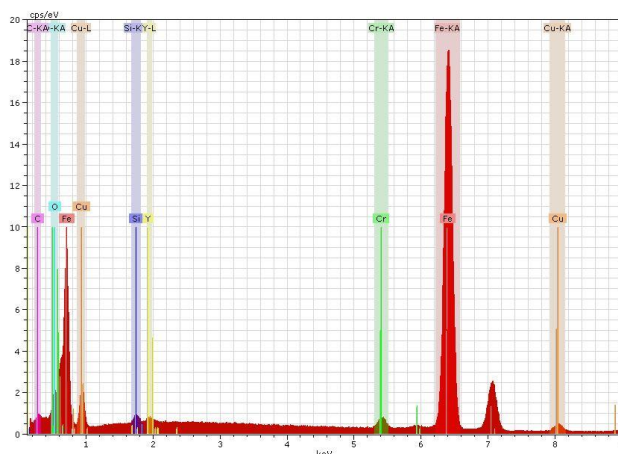
36. ábra: 0,5% Y_2O_3 + 0,5% CuO kopásnyom közepén az ittrium (bal) és réz (jobb) eloszlása.

Az oxigén szempontjából nagymértékű dúsulás látható a referenciához képest és eloszlását tekintve teljesen homogén, nincs megfigyelhető egybetömörülés a kopásnyom közepének területén. A 37. ábra mutatja az oxigén eloszlását a felületen.



37. ábra: 0,5% Y_2O_3 + 0,5% CuO kopásnyom közepén az oxigén eloszlása.

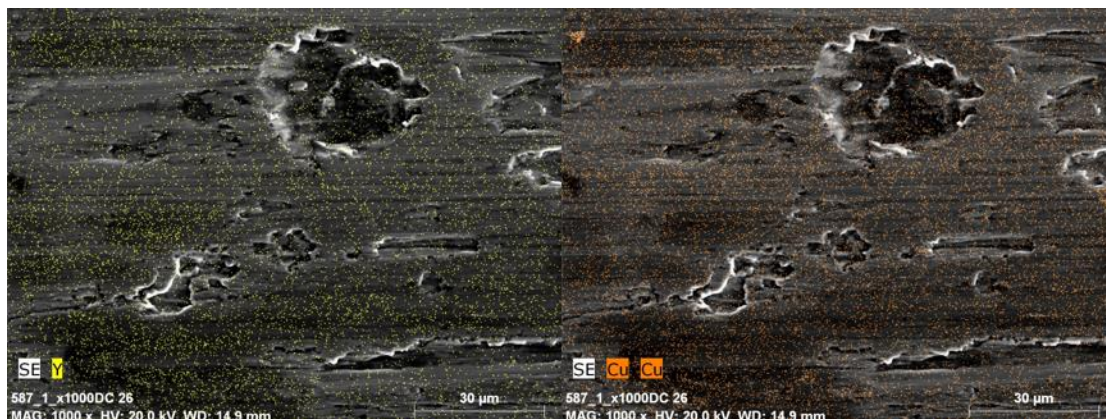
Az anyagi összetétel szemléltetésére a 0,5% Y_2O_3 + 0,5% CuO keverék kopásnyom közepében a 38. ábra szolgál, melyen jól kivehető az ittrium és oxigén dúsulás a referenciához képest és a réz tartalom nagymértékű növekedése.



38. ábra: 0,5% Y_2O_3 + 0,5% CuO kopásnyom közepén az EDX spektrum.

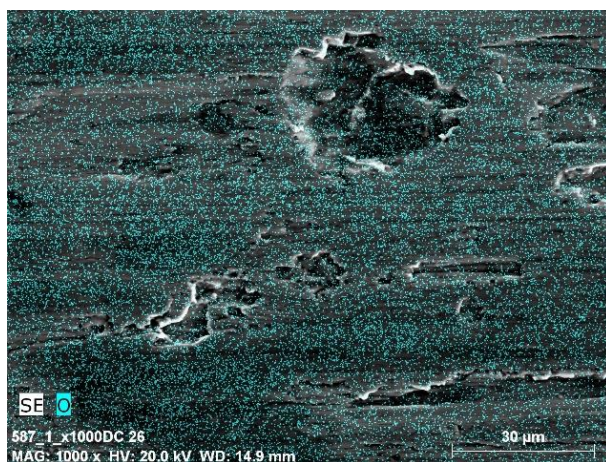
Az előző 4 mérést tekintve az anyagok eloszlása és összetétele a kopásnyom közepén és a holtponthoz képest megegyezők voltak, emiatt nem történt említés a holtpontról. Ezzel ellentétben a 0,5% Y_2O_3 + 0,5% CuO keverék tekintetében szembetűnő eltérések figyelhetők meg a kopásnyom közepén és a holtpontjában. Míg a kopásnyom közepén nem figyelhetők meg fekete foltok, mint az előző mérések során, addig a holtponthoz képest láthatóvá válnak és egyértelmű az ittrium tömörülése a fekete foltok területén. Ebből arra lehet következtetni, hogy egy ittriumban dús védőréteget képzett a felületre a holtponthoz képest. Réz tekintetében ezen a területen mindössze

néhány kisebb pontban figyelhető meg a redukció, nem annyira erőteljes, mint a kopásnyom közepén és ez a terület összességében kevesebb rézet is tartalmaz. Így elmondható az, hogy ezen keverék esetében teljesen máshogy viselkedik az olajkeverék a kopásnyom közepén, ahol a relatív sebesség a legnagyobb, mint a holtpontban. A 39. ábra mutatja meg az ittrium és réz eloszlását a kopásnyomban.



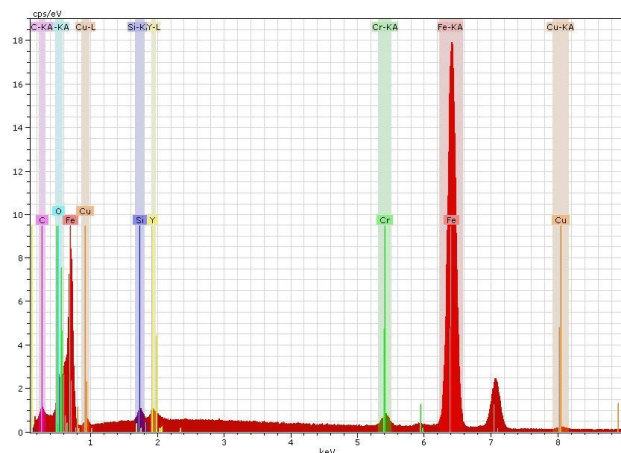
39. ábra: 0,5% Y_2O_3 + 0,5% CuO kopásnyom holtpontjában az ittrium (bal) és réz (jobb) eloszlása.

Az oxigén a kopásnyom holtpontjában is dúsulást mutatott a referencia értékhez képest, de eloszlását tekintve nem figyelhető meg az, hogy a nagyobb ittrium tartalommal rendelkező területeken, több oxigén lenne látható. Tehát a mérési folyamat során a holtpontban, ahol a golyó sebessége 0 és a kenési tulajdonságok a leggyengébbek, egy teljesen más eredményt kaptunk, mint a kopásnyom közepén. Az oxigén teljesen homogén állapotot vett fel a mért területen. Az oxigén eloszlását a 40. ábra szemlélteti.



40. ábra: 0,5% Y_2O_3 + 0,5% CuO kopásnyom holtpontjában az oxigén eloszlása.

Az anyagi összetétel szemléltetésére a 41. ábra szolgál, mellyel kimutatható a kopásnyom közepén lévő réz mennyiséghez való csökkenés, ezzel ellentétben pedig az ittrium növekedés és vele együtt az oxigén tartalom növekedése is.



41. ábra: 0,5% Y_2O_3 + 0,5% CuO kopásnyom holtpontjában az EDX spektrum.

7.9. Költségekalkuláció

A hosszútávú célt vizsgálva megállapítható, hogy már az egy adalékot tartalmazó keverékek esetében is jelentősen megnő az olajkeverék literenkénti költsége. Mivel ezen nanoadalékok adalékok ára elég magas jelenleg, ezért két adalék esetében az olaj még költségesebb lenne. Így a két adalékkal készített olajok használata csak akkor éri meg, ha a javító tulajdonságai a referenciához és az egyadalékos keverékhez képest is kiemelkedően jók. A költségben történő változásokat a 18. táblázat tartalmazza.

Nanoadalék keverékek	1 l olajban való drágulás
0,25% Y_2O_3 + 0,25% SiO_2	9.212 Ft
0,5% Y_2O_3 + 0,5% SiO_2	18.516 Ft
0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2	11.065 Ft
0,4% ZrO_2 + 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2	14.296 Ft
0,5% Y_2O_3 + 0,5% CuO	19.513 Ft

18. táblázat: Költségekben történő változás.

8. Konklúzió

A korábbi eredmények alapján 5 olajkeverék került összeállításra, melyekkel tribométeres mérések történtek. A kísérletek során 5 olajkeverék került felhasználásra és kiértékelésre, melyek a 0,25% Y_2O_3 + 0,25% SiO_2 , 0,5% Y_2O_3 + 0,5% SiO_2 , 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 , 0,4% ZrO_2 + 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 keverékek voltak. Az 5 darab keverékből 4 alkalmasnak tekinthető a súrlódó alkatrészek élettartamának növelésére, mivel mind az alapolajhoz, mind pedig az előzetes mérések során kapott eredményekhez mérten a kopástérfogatot

nagymértékben csökkentették és ezzel együtt a keverékek FAI, COF és WSD értékei referencia érték alá kerültek.

A 0,25% Y_2O_3 + 0,25% SiO_2 keverék esetében szintentartás figyelhető meg a FAI értékeiben, a további három szempontnál pedig egyértelmű a javulás. Az EDX által készített felvételek alapján elmondható, hogy kisebb felületvédő réteget képes alkotni, amely a felületet megvédi a kopástól. A referenciához képest a FAI értékét 1%-kal növelte, a COF értékét 7%-kal, a WSD értékét 31%-kal és a WV értékét 87%-kal javította.

A 0,5% Y_2O_3 + 0,5% SiO_2 keverék esetében minden szempontban javulás látható. A 0,25% Y_2O_3 + 0,25% SiO_2 keverékhez képest nagyobb javító tulajdonságokat ért el és EDX spektrum és a SEM felvételek alapján megfigyelhető, hogy nagyobb felületvédő réteget képes létrehozni, így a rendszer tovább fenntartható. A referenciához képest a FAI értékét 8%-kal, a COF értékét 17%-kal, a WSD értékét 32%-kal és a WV értékét 94%-kal javította.

A 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 keverék esetében minden szempontban javulás látható a referenciához képest. Ez a keverék hasonló eredményeket produkált, mint a 0,5% Y_2O_3 + 0,5% SiO_2 keverék, annyi különbséggel, hogy a kopásnyom felületén létrehozott védőréteg kevesebb területen figyelhető meg, így ez a rendszer nem tartható fent annyi ideig, mint a 0,5% Y_2O_3 + 0,5% SiO_2 keveréknél. A referenciához képest a FAI értékét 8%-kal, a COF értékét 16%-kal, a WSD értékét 36%-kal és a WV értékét 93%-kal javította.

A 0,4% ZrO_2 + 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 keveréknél is elmondható az, hogy a figyelembe vett szempontoknál javulás látható. A 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 keverék értékeit a hozzáadott cirkónium-oxid rontotta. Az EDX és SEM felvételekből megállapítható, hogy a hozzáadott cirkónium-oxid az ittrium-oxiddal reakcióba lépett és a felületen így homogén állapotban figyelhető meg mindkét adalék. A referenciához képest a FAI értékét 6%-kal, a COF értékét 14%-kal, a WSD értékét 1%-kal és a WV értékét 20%-kal javította.

A 0,5% Y_2O_3 + 0,5% CuO keverék esetében minden figyelembe vett szempontban javulás látható. Az EDX és SEM felvételeken látható, hogy a réz(II)-oxid elemi rézzé és oxidálódott réz(I)-oxiddá alakult át oxigénredukció útján. Ez egy vékonyabb védőréteget alkot a felületen, amely gátolja a felület kopását, ennek köszönhető a nagymértékű javulás a kopástérfogat szempontjából. A referenciához képest a FAI értékét 3%-kal, a COF értékét 8%-kal, a WSD értékét 18%-kal és a WV értékét 92%-kal javította.

A legeredményesebb kombinációk a 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 és 0,5% Y_2O_3 + 0,5% SiO_2 olajkeverékkel készített mérések a kapott eredmények alapján. Mivel a kopástérfogat nagymértékű javítása mellett a szórásokat is minimalizálta, így a legstabilabb rendszert ezek a mérések tudják biztosítani és egy olyan felületvédő réteget képesek létrehozni, amely a

felületek kopását gátolják. Ha a költségeket is figyelembe veszik, akkor a 0,3% Y_2O_3 +0,3% SiO_2 keverék produkálta legjobb eredményeket, melynél a referenciához képest a FAI értékét 8%-kal, a COF értékét 16%-kal, a WSD értékét 36%-kal és a WV értékét 93%-kal javította.

Elmondható a mérések alapján, hogy a koncentráció növelése nem feltétlen eredményez a megadott szempontokban növekedést, de védőfilmréteget a nagyobb koncentrációval készített ittrium és szilícium keverék nagyobb területen képesek létrehozni, így a rendszer sokkal tovább fenttartható. Bizonyos esetekben elérhető egy nagyobb koncentrációval rendelkező keverékkel ugyan az az érték, mint egy kisebb koncentrációjú keverékkel, bár ez magasabb költséget is jelent. A hármas keverékből kiindulva elmondható a nanorészecskék sokszínűsége, mivel a 0,3% Y_2O_3 + 0,3% SiO_2 keverékhez hozzáadott 0,4% ZrO_2 -nek az előzetes mérések alapján javítania kellett volna az értékeket, de a nanorészecskék egymással való viselkedése még mindig nagy kérdés a kutatások során. Mindemellett a koncentrációk nagysága is döntő szerepet játszik az egymással való reakcióba lépésben.

Ez a kísérlet is bizonyította, hogy a nanorészecskékkel való kísérletezés nagyon fontos, hogy jobb képet kapjunk az egymással való reakciójukról és nem elég az előzetes feltételezés. Mindemellett az eredmények tekintetében elmondható, hogy nanorészecskék hozzáadásával a bázisolaj tulajdonságai javíthatók. A kutatás során végzett mérések olajkeverékei hozzájárulhatnak a súrlódó alkatrészek élettartamának nagymértékű növeléséhez, de ehhez további motorolajfejlesztési kutatások szükségesek.

9. Irodalomjegyzék

- [1]. Pölczmann, György & Baladincz, Jenő & Hancsók, Jenő. (2008). Investigation Of Producing Modern Base Oils. Hungarian Journal of Industrial Chemistry. 36. 107-112.
- [2]. <https://onroad.hu/2019/12/12/motorkerekpar-motorolaj-tudnivalok-2/>, 2022.11.16
- [3]. Wang, XB., Liu, WM. (2013). Nanoparticle-Based Lubricant Additives. In: Wang, Q.J., Chung, YW. (eds) Encyclopedia of Tribology. Springer, Boston, MA.
- [4]. Bubálik Márk: *Dízelgázolajok detergens-diszpergens típusú adalékainak előállítása és vizsgálata*, PhD értekezés, Pannon Egyetem, Veszprém, 2009
- [5]. <https://docplayer.hu/10391616-Kenoanyagok-kemiaja-es-technologiaja.html>, MOL-LUB Kft., 2016
- [6]. James T. Bartis, Eric Landree: *Nanomaterials in the Workplace: A Summary of the RAND Policy and Planning Workshop on Occupational Safety and Health*, the RAND Corporation, Santa Monica/Arlington/Pittsburgh, 2006, 50

- [7]. Alberto, A.R., Matos, C., Carmona-Aparicio, G., Iten, M. (2022). Nanomaterials, a New Challenge in the Workplace. In: Louro, H., Silva, M.J. (eds) Nanotoxicology in Safety Assessment of Nanomaterials. Advances in Experimental Medicine and Biology, vol 1357. Springer, Cham.vol.
- [8]. S. Bárány: *A Kolloidkémia alapjai*. Beregszász: II. Rákóczi Ferenc Kárpátaljai Magyar Főiskola, 2015.
- [9]. Oomen, A.G.; Bleeker, E.A.J.; Bos, P.M.J.; Van Broekhuizen, F.; Gottardo, S.; Groenewold, M.; Hristozov, D.; Hund-Rinke, K.; Irfan, M.-A.; Marcomini, A.; et al. Grouping and Read-Across Approaches for Risk Assessment of Nanomaterials. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2015, *12*, 13415-13434.
- [10]. Wohlleben, Wendel & Kuhlbusch, T.A.J. & Schnekenburger, Jürgen & Lehr, Claus-Michael & Dopp, Elke. (2014). Safety of Nanomaterials along Their Lifecycle: Release, Exposure, and Human Hazards.
- [11]. Ádám Anna Adél: *Nikkel tartalmú nanokatalizátorok előállítása, szerkezetük jellemzése és katalitikus felhasználása*, „PhD disszertáció”, Szegedi Tudományegyetem, Szeged, 2020
- [12]. Poh, Tuang & Ali, Nur & Mac Aogáin, Micheál & Hussain, Mustafa & Setyawati, Magdiel & Ng, Kee & Chotirmall, Sanjay. (2018). Inhaled nanomaterials and the respiratory microbiome: clinical, immunological and toxicological perspectives. *Particle and Fibre Toxicology*.
- [13]. Jeevanandam, Jaison & Barhoum, Ahmed & Chan, Yen San, Stephanie & Dufresne, Alain & Danquah, Michael. (2018). Review on nanoparticles and nanostructured materials: History, sources, toxicity, and regulations. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 9. 1050 - 1074.
- [14]. Szekeres, Barbara & Szűcs-Somlyó, Éva & Lehel, József & Csaba, Kövágó. (2020). Nanorészecskék – múlt, jelen, jövő. *Egészségtudomány*. 64. 16-38.
- [15]. Tóth, Álmos Dávid (2019) *Különböző súrlódáscsökkentő kenőolaj-adalékok tribológiai hatásainak vizsgálata = The Investigation of the Tribological Behaviour of Several Friction Modifier Lubricant Additives*. MŰSZAKI KATONAI KÖZLÖNY, 29 (1). pp. 43-56. ISSN 1219-4166
- [16]. BMT SZE.: Tribológia labor, <https://bmt.sze.hu/tribologia-laboratorium>, 2022.02.25
- [17]. Koehlerinstrument.: SRV5 tesztrendszer, <https://koehlerinstrument.com/products/srv5-test-system/>, 2022.02.26
- [18]. Lenart, Agnieszka & Pawlus, Pawel & Wos, Slawomir & Dzierwa, Andrzej. (2018).

- The Effect of Surface Texturing on Dry Gross Fretting. Lubricants. 6. 92.
- [19]. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5708>, 2023.04.03
- [20]. <https://www.fh-ooe.at/en/wels-campus/werkstofftechnik/departement-of-materials-engineering/equipment/microskopy/leica-dcm3d-confocal-microscope/>, 2023.04.03
- [21]. <http://metal.elte.hu/oktatas/alkfizlab/meresleirasok/SEM3.pdf>, 2023.04.03
- [22]. Tóth, Álmos Dávid & Mike-Kaszás, Nóra & Bartus, Gábor & Hargitai, Hajnalka & Ádám István, Szabó. (2023). Surface Modification of Silica Nanoparticles with Ethyl Oleate for the Purpose of Stabilizing Nanolubricants Used for Tribological Tests. Ceramics. 6. 980-993.
- [23]. Ádám István, Szabó & Leskó, Máté & Hargitai, Hajnalka & Tóth, Álmos Dávid. (2022). Investigation of the Applicability of Y₂O₃–ZrO₂ Spherical Nanoparticles as Tribological Lubricant Additives. 10. 14.
- [24]. Tóth, Álmos Dávid & Ádám István, Szabó & Leskó, Máté & Rohde-Brandenburger, Jan & Kuti, Rajmund. (2022). Tribological Properties of the Nanoscale Spherical Y₂O₃ Particles as Lubricant Additives in Automotive Application. Lubricants. 10. 28.
- [25]. Tóth, Álmos Dávid & Fodor, Tamás. (2020). Nanoméretű réz(II)-oxid kerámiarészecskékkal erősített kenőolaj tribológiai vizsgálata. Hadmérnök. 15. 75-92.