Széchenyi István Egyetem

Közlekedés- és járműtudományok

Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola

Tóth Álmos Dávid

okleveles járműmérnök

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

Doktori tézisfüzet

Témavezető:

Dr. Kuti Rajmund

Győr, 2021.

1. A kutatási téma ismertetése, célkitűzésekés hipotézisek

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

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

Az emberi élettér egészségességének megőrzése érdekében nem csak a járművek működése során (tank-to-wheel) kibocsátott szén-dioxid mennyiségét szükséges vizsgálni és szabályozni, hanem az üzemanyag gyártása során keletkező (well-to-tank) károsanyagokat is, illetve a járművek gyártási és későbbi

újrahasznosítási folyamatai során keletkező emissziót is figyelembe kell venni (Life Cycle Assessment).

Minden ismétlődő mozgással üzemelő berendezés számára nélkülözhetetlen a megfelelő kenéstechnika és kenőanyag. Egy belsőégésű motor esetén ezen kijelentés hatványozottan igaz: a kenőolaj egy motorban nagyon komplex igénybevételeknek (mechanikai és hőigénybevétel) van kitéve. A motorokban használt kenőolaj kritikus eleme a hajtáslánc ezen egységének, hiszen Wang és társai tanulmánya [1] szerint a világ elsődleges energiafelhasználásának egyharmada a súrlódási veszteségek által hasztalanul kerül felhasználásra. Továbbiakban megemlítendő, hogy a mechanikai berendezések károsodásának 60 százalékáért az alkatrészek felületén keletkező kopás tehető felelőssé, míg a mechanikai károsodások több mint 50 százalékáért valamilyen kenési elégtelenség okolható. A belsőégésű motorokban használt kenőolajok folyamatos fejlesztése kiemelt szerepet játszik a jelenlegi és jövőbeli mobilitás szempontjából. A kenőolajok fejlesztésének céljai szerteágazóak: viszkozitás csökkentés, kenőolaj adalékok fejlesztése és optimalizálása, kenőolajok öregedési folyamatainak megértése és szabályozása, vagy akár a jövőbeli lehetséges alternatív üzemanyagok kenőolajra gyakorolt hatásainak szabályozása.

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

A kutatás főbb célkitűzései a következők:

1. A jelenleg is hatályos kenőolaj tribológiai összehasonlító szabvány (ISO 19291:2016) elemzése a motorolajok komplex igénybevételeinek figyelembevételével. További cél a szabvány beállítási paraméterei tribológiai

eredményekre gyakorolt hatásainak vizsgálata, és egy stabil, alacsony szórásmezővel rendelkező vizsgálati módszer kifejlesztése, amely az olajok motorban tapasztalt folyamatait valósághűbben leképezi.

2. A nanoméretű kerámia szemcsék kenőolajban történő homogenizálására nem található egy, a kutatók által széleskörben alkalmazott bekeverési folyamat, ezért jelen kutatásban célként tűztem ki, hogy egy megbízható, reprodukálható bekeverési folyamatot definiáljak.

3. A kiválasztott három nanoméretű kerámia részecske (ZrO_2, CuO és Y_2O_3) kenőolajba homogenizált állapotban biztosított tribológiai tulajdonságainak és működési folyamatainak meghatározása.

   a) A cirkónium(IV)-oxid kerámia alacsony siklási tulajdonságú felületi bevonatként való alkalmazása alapján valószínűsítem, hogy a nanoméretű ZrO_2 szemcsék kenőolajban használva hasonló tulajdonságokat biztosítanak az egymáson elmozduló alkatrészek számára, mint az ugyanilyen anyagot is tartalmazó felületi bevonatok.

   b) Feltételezésem szerint a nanoméretű réz(II)-oxid szemcsék a tribológiai vizsgálat során használt peremfeltételek mellett képesek elemi rézzé redukálódni, az olajmintát felépítő szénhidrogének képesek lehetnek oxigént elvonni a CuO nanorészecskéktől. Az így redukálódott réz az alacsony keménysége miatt fel fog kenődni az érintkező felületekre és ott tribológiai védőréteget képezve pozitívan fogja befolyásolni a rendszer súrlódási és kopási tulajdonságait. Véleményem szerint ezen feltételezés megfelelő tribológiai vizsgálatokkal bizonyítható.

   c) Meglátásaim szerint gyakorlati tesztekkel bizonyíthatom, hogy az ittrium(III)-oxid a kiváló polírozó tulajdonsága alapján mikroszkópikus szintű alakváltozást fog okozni az érintkező

felületeken, amelyek a megfelelő nanorészecske-koncentráció mellett képesek lehetnek a tribológiai terhelés felületi eloszlását javítani, növelve ezzel a rendszer terhelésfelvevő képességét és kopásállóságát.

2. Új tudományos eredmények összefoglalása, tézisek

1. tézis [s1]

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

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

2. tézis [s2 – s6]

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

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

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

3. tézis [s3, s5, s7, s8]

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

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

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

Mikroszkópos felvételekkel bizonyítottam, hogy az elemi réz alacsony keménysége miatt képlékeny alakváltozást szenved a tribológiai vizsgálat

során és rátapad a súrlódó felületekre, ezáltal mintegy tribológiai védőrétegként segítve a fellépő súrlódási és kopási veszteségek csökkentését.

4. tézis [s9]

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

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

B) A kopáscsökkenés bizonyítására elektronmikroszkópos elemzést alkalmaztam, melynek során az ittrium(III)-oxid kerámiaszemcsék kettős működési mechanizmusát állapítottam meg. Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálattal és EDX analízissel kimutattam, hogy a nanoszemcsék kitöltik a felületi érdességi árkokat, alacsonyabb felületi érdességgel rendelkező érintkezési felületet biztosítva a tribológiai rendszer számára. Megállapítottam továbbá, hogy az ittrium(III)-oxid szemcsék elősegítik az

érintkező tribológiai felület lokális, szabad szemmel nem látható képlékeny alakváltozását, amely szintén segíti a tribológiai terhelés kontaktfelületen történő egyenletesebb eloszlását.

3. Összefoglalás és további kutatási irányok

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

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

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

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

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

vizsgálata, a szemcsék hatása a kipufogógáz utánkezelő rendszerekre, vagy a motorolaj működés közbeni öregedésre gyakorolt hatásainak elemzése.

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

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

4. A tézisfüzetben hivatkozott saját publikációk

[s1] Á. D. Tóth, L. Paulovics, B. Hanula, J. Knaup, A. Kopp: Methodenentwicklung zur Einstufung von Motorölen anhand tribologischer

Eigenschaften, in: 58. Tribologie Fachtagung, Gesellschaft für Tribologie e.V. (GfT) 2017, pp. P8/1 – P8/11.

[s2] Á. D. Tóth: ZrO_2 anyagösszetételű nano-méretű kerámia anyag kenőolaj-adalékként való használhatóságának vizsgálata, in Kutatási jelentés 1., Universitas-Győr Nonprofit Kft., Győr, 2019, pp. 257-263.

[s3] Á. D. Tóth: Investigation of the tribological properties of selected nano-ceramic materials as lubricant additives in automotive engine oils, in Tavaszi Szél Konferencia 2019: Nemzetközi Multidiszciplináris Konferencia: Absztaktkötet, Doktoranduszok Országos Szövetsége (DOSZ) Budapest, 2019, pp. 191-200.

[s4] Á. I. Szabó, Á. D. Tóth, J. Knaup: Nano-méretű cirkónium-dioxid kerámia kenőolaj adalékként való alkalmazhatóságának vizsgálata in: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT) XXIV. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, OGÉT 2019, pp. 505-508.

[s5] Á. D. Tóth, J. Knaup: Investigation of the tribological properties of nano-scaled ZrO_2 and CuO additive in automotive lubricants in: IOP Conference Series: materials Science and Engineering, vol. 903, 2020, 012015.

[s6] Á. D. Tóth, Á.I. Szabó, R. Kuti: Tribological Poperties of Nano-Sized ZrO_2 Ceramic Particles in Automotive Lubricants, in: FME Transactions, vol. 49, 2021, pp. 36-43.

[s7] Á. D. Tóth, T. Fodor: Nanoméretű réz(II)-oxid kerámiarészecskékkel erősített kenőolaj tribológiai vizsgálata, in: Hadmérnök, vol. 15, no. 3, 2020, pp. 75-92.

[s8] Á. D. Tóth, Á.I. Szabó, J. Rohde-Brandenburger, R. Kuti: Tribological Investigation of Applicability of Nano-Sized Cupricoxide (CuO) Ceramic Material in Automotive Vehicles, in: FME Transactions, vol. 49, 2021, pp. 335-343.

[s9] Á. D. Tóth, Á. I. Szabó, J. Rohde-Brandenburger, R. Kuti: Impact of Yttria Reinforced Nanolubricants onto the Tribological Properties, in: Hidraulica, vol 3, 2021, pp. 26-34.

5. A tézisfüzetben nem hivatkozott saját publikációk

[s10] Á. D. Tóth, J. Knaup: Különböző kenőolaj adalékok tribológiai tulajdonságainak vizsgálata, in: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT) XXIV. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, OGÉT 2019, pp. 565-568.

[s11] Á. D. Tóth: Különböző súrlódáscsökkentő kenőolajadalékok tribológiai hatásainak vizsgálata, in Műszaki Katonai Közlöny, 29. évfolyam, 1. szám, 2019, pp. 43-56.

[s12] D. O. Csepreghy, Á.D. Tóth, J. Knaup: Ultra-alacsony viszkozitású kenőolajak tribológiai tulajdonságainak vizsgálata in: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT) XXIV. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, OGÉT 2019, pp. 71-74.

[s13] Á. D. Tóth, K. Schintzel, A. Dudás: Kerámia erősítésű, atmoszférikus plazmaszórt, korrózióálló hengerfal-bevonatok súrlódási tulajdonságainak vizsgálata, in: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT) XXIV. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, OGÉT 2016, pp. 443-446.

6. A tézisfüzet nem saját hivatkozásai:

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