

Kísérleti modell kialakítása a szintetikus tüzelőanyagok által előidézett kenőolajöregedés hibrid járművek motoralkatrészeinek kopására gyakorolt hatásának vizsgálatára

1. BEVEZETÉS

Doktori kutatási programom tárgya a hibrid hajtáslánccal rendelkező személygépjárművek alternatív tüzelőanyagokkal történő üzemeltetése során végbenő kenőanyagdegradációs folyamatok műszaki felületek kopására gyakorolt hatásának vizsgálata. A tisztán elektromos hajtáslánccal rendelkező járművek elterjedése a vártnál lassabb ütemben halad, amely a jelenleg rendelkezésre álló technológiával előállítható akkumulátorok korlátozott kapacitására, valamint az általánosan elérhető elektromos gyorstöltő állomások kis számára vezethető vissza. A gazdasági és fenntarthatósági szempontból is kedvezőtlenebb vegyes (hibrid) hajtáslánccal a végfelhasználó számára előnyösebb alternatívát jelentenek a belsőégésű erőforrás által biztosított nagy hatótávolság, valamint a sűrűn lakott zónákban elegendő hajtóerőt és használati időt biztosító elektromos kiegészítő hajtáslánc által. Utóbbi megléte biztosítja továbbá, hogy a végfelhasználó korlátozás nélkül használhatja járművét a nagyvárosok centrális zónáiban is, ahonnan a hagyományos hajtáslánccal rendelkező járművek az Európai Unió több régiójában kitiltásra kerültek, vagy kerülnek a 2020–2030-as intervallumban. További globális trend a megújuló forrásból származó (bio), valamint mesterségesen előállított (szintetikus) tüzelőanyagok arányának fokozatos növekedése a piacokon. Az Európai Unió 2030-ra vonatkozó prognózisa a töltőállomásokon forgalomba hozható gépjármű hajtóanyagok megújuló komponens tartalmát 15-30%-ra emeli a jelenleg hatályban lévő 10% maximális alkoholtartalomról. Ezen körülmények mellett kulcsfontosságú a jelenleg közúti forgalomban résztvevő, valamint új forgalomba helyezésű járművek, továbbá ezen járművekhez gyártott kenőanyagok kompatibilitásának biztosítása az újfajta hajtóanyagokkal a hosszútávú, megbízható üzemeltethetőség érdekében.

[1] Széchenyi István Egyetem, Audi Hungaria Járműmérnöki Kar, Belsőégésű Motorok és Járműhajtások Tanszék, tanársegéd. Témavezető: Dr. Zsoldos Ibolya.

A doktori kutatásom lezárult szakaszában kimutatásra került bizonyos szintetikus tüzelőanyag összetevők károsító hatása a jelenlegi kenőolaj formulációkra,^[2] továbbá kialakításra került egy mesterséges kenőolajöregítő berendezés,^[3] amelyel kontrollált körülmények között lehetséges motorolajok oxidációval szembe-ellenálló képességének költséghatékony vizsgálata. A berendezés lehetővé teszi a minták célzott szennyezését tetszés szerinti anyagokkal, például válogatott tüzelőanyagokkal, illetve hűtőfolyadékkal. Az így előállított minták szabványos vizsgálata során megállapításra került, hogy a leegyszerűsített vizsgálati modellt alkalmazó eljárások nem elegendően érzékenyek a kenőolajok elhasználódásának, valamint a szennyezők hatásának kimutatására, így olyan kísérleti eljárás kidolgozása vált szükségessé, amely szabályozott körülmények mellett, gyors átfutási idővel, valóságos alkatrészekhez közeli anyag-, és felületminőségek mellett képes kimutatni az egyes szennyezők kenőolajöregedésre gyakorolt hatását.

A kutatási tevékenység célja egy olyan kísérleti eljárás kifejlesztése, amely

- sorozatban gyártott motoralkatrészek preparálásával és/vagy szubsztraktív megmunkálásával állít elő a késztermékben (járműmotorban) megtalálható felületekkel és anyagokkal egyező minőségű kísérleti mintát, amely alkalmas súrlódásmérő és koptató kísérleti berendezésen történő vizsgálatok folytatására,
- képes a motorban fellépő kritikus terhelési állapotok – szélsőségesen magas felületi nyomás és hőmérséklet, valamint kényszerkenési állapotok – leképezésére,
- rövid idő alatt – mintánként 2-5 óra – képes optikai és/vagy gravimetrikus úton meghatározható mértékű kopás előállítására – legalább 100 µg tömeg és legalább 150 nm érdességváltozás,
- kellően robusztus eredményeket szolgáltat azonos minőségű minták esetén – a kísérletek során és azt követően rögzített mennyiségek statisztikai kiértékelése során nem állapítható meg szignifikáns eltérés,
- kellően érzékeny a különböző minőségű minták közötti különbségek kimutatásához – a kísérletek során és azt követően rögzített mennyiségek statisztikai kiértékelése során szignifikáns eltérés állapítható meg,
- kompatibilis a kenőolajok minősítése során használt ISO 19291:2016, DIN 51834-2, ASTM D6425 és ASTM D7421 szabványok által javasolt súrlódásmérő és koptató kísérleti berendezésekkel.

[2] NAGY, A. L. – KNAUP, J. – ZSOLDOS, I.: A friction and wear study of laboratory aged engine oil in the presence of diesel fuel and oxymethylene ether, in: *Tribology – Materials, Surfaces&Interfaces*, 2019, 13:1, 20–30.

[3] NAGY, A. L.: Development of an artificial aging process for automotive lubricants, in: *Tavaszi Szél*, 2019, Konferencia, Budapest.; NAGY, A. L. – ZSOLDOS I.: Artificial Aging of Ultra-low Viscosity Lubricant Samples on a Programmable Oil Aging Rig, in: Jármű K. – Voith K. (eds): *Vehicle and Automotive Engineering 3*, VAE 2020, Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore, 2021.

2. FELHASZNÁLT ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

A kitűzött célok elérése érdekében az alábbiakban ismertetett kísérleti módszertanok, valamint mérnöki technológiák kerültek alkalmazásra.

2.1. Motoralkatrészek preparálása

Annak érdekében, hogy a sorozatban gyártott alkatrészekből készült minták célgépekkel történő tribológiai vizsgálatát el lehessen végezni, szükséges ezen alkatrészek előzetes megmunkálása. A kiválasztott tribológiai rendszer (dugattyúgyűrű-hengerfal) két központi elemének preparálásához több lehetséges módszer áll rendelkezésre. A gyűrűk megmunkálása az alkatrész kisebb méretéből adódóan egyszerű labortechnikai precíziós vágógép segítségével kellő pontossággal megoldható, azonban a nagyobb méretű és tömegű hengertömb megmunkálása több megmunkálási lépés alkalmazását kívánja meg. A lehetséges megmunkálási technológiák előnyeinek és hátrányainak, valamint költségeinek mérlegelését követően az alábbi technológiai eljárás került alkalmazásra:

- sorozatban gyártott hengertömb elődarabolása nagyméretű fémipari szalagfűrészsel,
- elődarabolt hengersor precíziós darabolása huzalszakra forgácsolással,
- precíziós darabolással előállított hengersizetek készre munkálása huzalszakra forgácsolással.

Az elődarabolás során a készre munkált hengertömből leválasztjuk a hengersort. A leválasztott hengersor ezt követően befogható a huzalszakra forgácsológép munkaterébe, amely képes a hengerekből kívánt szélességű és alaktűrűsű szeletek előállítására. A hengersizetek kívánt méretre vágásával a tribológiai kísérletek során alkalmazandó minták előállítása lezárul. Ezzel a technológiával, kis anyagvesztéssel állítható elő nagyszámú minta egyetlen hengertömbből. A hengertömb gyártási folyamata során keletkező maradó feszültségek következtében a kimunkált szegmensek eltorzulhatnak, megcsavarodhatnak, ezért szükséges a tribológiai kísérleteket megelőzően a mintadarabok válogatása.

A vizsgálatok során egy 1400 cm³ lökettérfogatú turbófeltöltött benzinmotor plazmaszórásos technológiával felületkezelt alumínium hengertömbje, valamint az ehhez tartozó 1. és 2. dugattyúgyűrűk kerültek felhasználásra.

2.2. Kenőanyagok előkészítése

A kísérletek során alkalmazott kenőanyag mintákat a Nagy, A. L. Development of an artificial aging process for automotive lubricants és Nagy, A. L. – Zsoldos I. Artificial Aging of Ultra-low Viscosity Lubricant Samples on a Programmable

Oil Aging Rig publikációkban^[4] közölt módszerekkel állítottuk elő. Ez a módszer alkalmasnak bizonyult olyan kenőolajminták mesterséges, költséghatékony előállítására, amelyek jól megfelelnek a vegyes járműhasználat során létre jövő használt kenőolaj-állapotnak. Az így előállított mintákkal lehetőség nyílik a különböző típusú mesterséges tüzelőanyagok mint szennyezőanyagok kenőolajra gyakorolt hatásának gyors összehasonlító vizsgálatára.

A kidolgozott módszer egy olyan ciklikus termo-oxidatív öregítő eljárás, amely 12-órás hőn tartási és polimerizációs fázisokból áll. Az öregítés során folyamatos, szabályozott térfogatáramú légáramlás agitálja az olajmintát. A módszerhez egyedileg épített és felprogramozott berendezés több fejlesztési iterációt követően alkalmas kellően megbízható, reprodukálható, jól szabályozott öregítési ciklusok lefolytatására.

A kísérletek során felhasznált kenőolaj az SAE besorolása szerinti 0W-30 osztályú Shell Helix Ultra ECT C2/C3. A tribológiai kísérletekhez előállított mesterséges öregített kenőolaj paramétereit, valamint kémiai tulajdonságait az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat: Tribológiai kísérletek során felhasznált referencia és öregített kenőolajok tulajdonságai

	A03.NOC	Referencia
Öregítési program	200 ml, 160°C, 2 l/min, 192 h	-
Kin. viszkozitás (40°C) [mm ² /s]	68,1	59,9
TBN [mgKOH/g]	6,2	8,2
Maradék ZDDP tartalom [%]	12	100
Maradék fenolos antioxidáns [%]	57	
Maradék aminos antioxidáns [%]	85	

2.3. Kísérleti minták előkészítése

A tribológiai kísérletek megkezdése előtt szükséges a kimunkált kísérleti minták előzetes tisztítása, továbbá felületének ellenőrzése. A tisztítási folyamat során szerves oldószeres ultrahangos fürdőben távolítottuk el a megmunkálás és mintakezelés során a felületre rakódott szennyeződések. A tisztítási folyamat lépései:

- előzetes tisztítás 2-propanol-aceton keverékkel,
- 10 perces ultrahangos tisztítás 50°C-on 2-propanol-aceton fürdőben,

[4] NAGY, A. L.: Development of an artificial aging process for automotive lubricants, in: *Tavaszi Szél*, 2019, Konferencia, Budapest.; NAGY, A. L. – ZSOLDOS I.: Artificial Aging of Ultra-low Viscosity Lubricant Samples on a Programmable Oil Aging Rig, in: Jármű K. – Voith K. (eds): *Vehicle and Automotive Engineering 3*, VAE 2020, Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore, 2021.

- 5 perces ultrahangos tisztítás 50°C-on 99,8% tisztaságú etanol fürdőben,
- minták szárítása meleg (~75°C) levegőben 5 percig.

A minták felületével kapcsolatban szükséges meggyőződni azok épségéről (mély karcok, nagyméretű hibák a felület bevonatában, oxidáció), továbbá szükséges meghatározni azok felületi érdességét, illetve lehetőség szerint azok felületi keménységét. A minták szemrevételezésére Nikon D5100 nagy felbontású digitális kamerával készült makrófelvételek, valamint Keyence VHX1000 digitális mikroszkóp felvételek által került sor. A minták felületi érdessége tapintásmentes technológiával, Leica DCM-3D konfokális mikroszkóp segítségével került meghatározásra. Az érdesség meghatározását mintánként 3 ponton készült panorámafelvételen végeztük el.

2.4. Tribológiai kísérleti módszertan

A tribológiai vizsgálatokat egy Optimol SRV5 típusú vizsgálóberendezésen végeztük el. Az eszközhöz rendelkezésre áll mindkét kísérleti minta (1. ábra) megfelelő rögzítésére alkalmas befogószerszám, amely biztosítja a dugattyúgyűrű és hengerfal szegmensek egymáshoz képesti pozicionálását és rögzítését a kísérletek során. A vizsgálati paraméterek alapját az Obert, P. – Müller, T. – Füsser, H.-J. – Bartel, D. The influence of oil supply and cylinder liner temperature on friction, wear and scuffing behavior of piston ring cylinder liner contacts – A new model test^[5] publikációban közölt módszertan adta. Az itt bemutatott módszerekből és eredményekből kiindulva, a rendelkezésre álló infrastruktúra és eszközök figyelembe vételével több különböző paraméterváltozattal végeztünk tribológiai kísérleteket. A kezdeti kísérletek során az alkatrészpárosítás, valamint a kenőanyag típusa és mennyisége nem változott. A terhelés értékének meghatározása tapasztalati értékekre alapozva, valamint az Obert, P. – Müller, T. – Füsser, H.-J. – Bartel, D. The influence of oil supply and cylinder liner temperature on friction, wear and scuffing behavior of piston ring cylinder liner contacts – A new model test és az Obert, P. – Müller, T. – Füsser, H.-J. – Bartel, D. Oil distribution and oil film thickness within the piston ring-liner contact measured by laser-induced fluorescence in a reciprocating model test under starved lubrication conditions publikációkban közölt értékeket alapul véve történt.^[6] A kísérlet során a terhelés két, illetve három lépésben épül fel:

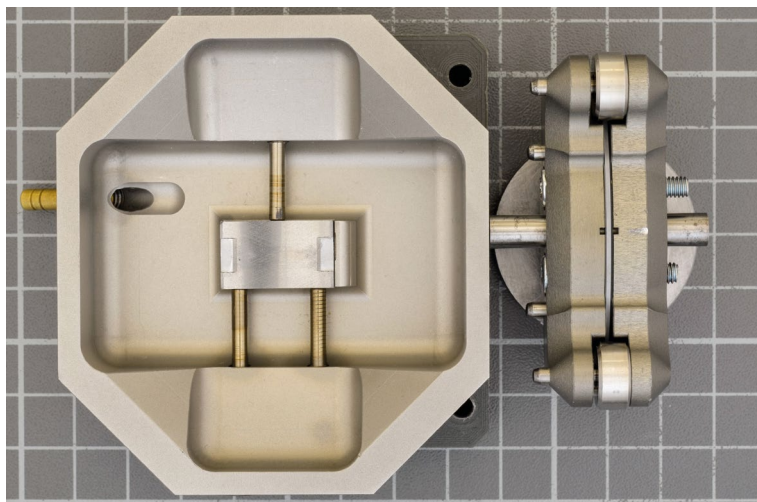
[5] OBERT, P. – MÜLLER, T. – FÜSSER, H.-J. – BARTEL, D.: The influence of oil supply and cylinder liner temperature on friction, wear and scuffing behavior of piston ring cylinder liner contacts – A new model test, in: *Tribology International*, 2016, 9., 306–314.

[6] OBERT, P. – MÜLLER, T. – FÜSSER, H.-J. – BARTEL, D.: The influence of oil supply and cylinder liner temperature on friction, wear and scuffing behavior of piston ring cylinder liner contacts – A new model test, in: *Tribology International*, 2016, 9., 306–314.; OBERT, P. – MÜLLER, T. – FÜSSER, H.-J. – BARTEL, D.: Oil distribution and oil film thickness within the piston ring-liner contact measured by laser-induced fluorescence in a reciprocating model test under starved lubrication conditions, in: *Tribology International*, 2019, 129., 191–201.

- A. 50 N előterhelés 5 percig, majd 200 N kísérleti terhelés,
- B. 50 N előterhelés 5 percig, majd 350 N előterhelés 10 percig, majd 200 N kísérleti terhelés,
- X. 50 N előterhelés 5 percig, majd 400 N kísérleti terhelés.

Az alkatrész és olajhőmérséklet, illetve a kísérlet időtartama az „A” terhelési esetben 120°C-on 120 perc és 240 perc, a „B” terhelési esetben 120°C-on 240 perc és 480 perc, 150°C-on 240 perc és 180°C-on 240 perc, az „X” terhelési esetben 150°C-on és 180°C-on is 240 perc.

1. ábra: Hengerfal (balra) és dugattyúgyűrű (jobbra) metszetek a számukra kialakított mintatartókban rögzítve



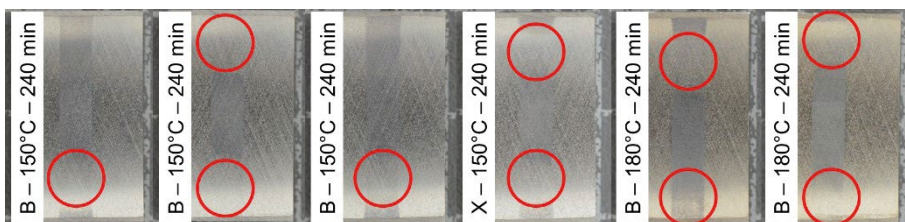
A kísérletek kezdetén 0,1 ml kenőolaj került felhordásra a hengerfalszegmens felületére. A vizsgálatok minden esetben 3 mm lökettel (súrlódási úthossz), valamint 50 Hz súrlódási frekvenciával kerültek elvégzésre. A kísérletek során a vizsgálati paraméterek szabályozott értéke mellett rögzítésre kerül a súrlódási együttható szélső és átlagos értéke 1 Hz gyakorisággal. A kísérleteket követően minden minta átesett az előkészítés során alkalmazott alkatrész tisztítási, valamint optikai szemrevételezési és mérési eljáráson.

3. EREDMÉNYEK

A vizsgálati eredmények értékelése során egyértelművé vált, hogy a kísérleti minták mintatartóban történő rögzítése, valamint ezek egymáshoz képesti pozícionálása alapvetően befolyásolja a kísérlet értelmezhetőségét. A minták gyártó által javasolt beállítása folyamatában csak a gyűrűszegmens kerül előzetesen rögzítésre a mintatartóban. A beállítási folyamatot során az egymáshoz szorított alkatrészek

közötti fényrés minimalizálása a cél. Így egy elméletileg konform érintkezési állapot biztosított a két alkatrész között, amely azonban csak a beállítás során áll fenn. A tényleges illeszkedés a vizsgálati berendezésben rögzített mintatartóba szerelt hengersizem és gyűrű között, az előterhelés felépítését követően alakul ki, amelyet a kísérleti berendezés jelen kialakításában lehetetlen ellenőrizni. A nem megfelelő beállításból eredő egyenlőtlen kopásképeket a 2. ábra szemlélteti.

2. ábra: Minták nem megfelelő pozicionálásából eredő egyenlőtlen kopásképek különböző kísérleti programok esetén. Piros körök jelölik a kopásnyomokban tapasztalható hibaképeket



A nem megfelelő illeszkedés következtében a minták érintkezésénél fellépő felületi nyomás magasabb, mint a kísérlet során elvárt érték. Továbbá az illeszkedési hiba sztochasztikus jellegéből adódóan nem megismételhető, a fellépő felületi nyomás eltérése a kívánt értéktől nem állandó, így a keletkező kopás mértéke nem lesz összehasonlítható az egyes kísérletek között.

Ebből kifolyólag az egyes terhelési esetek eredményei összehasonlítása addig nem lehetséges, amíg a kísérletek során fellépő súrlódási és kopási állapotok között még látszólag azonos kísérleti paraméterek esetén is alapvető különbségek jelentkeznek. Ennek értelmében jelen tanulmányban a súrlódási együtthatókra, valamint a kopás mennyiségére vonatkozó adatokat nem áll módunkban közölni.

A kopás mértékét és a kopásfolyamat jellegét alapvetően befolyásoló tényező továbbá a használt minták rugalmassága és felületi keménysége. Kisebb felületi keménységű dugattyúgyűrű szegmenseket alkalmazva a kényszerezett tribológiai rendszer az előterhelés alatt képes a kisebb mértékű pozicionálási hibákat felvenni, így egyenletes érintkezést és egyenletes kopásképet produkálni. A kísérleti minták mechanikai tulajdonságai olyan adottságok, amelyek nem minden esetben választhatók meg tetszőlegesen. Ebből kifolyólag szükséges egy olyan módszer kidolgozása, amellyel lehetséges a két kísérleti minta beállítása a vizsgálati berendezésben, vagy azzal megegyező körülmények között, ahol teljesül:

- a dugattyúgyűrű és hengerfal szegmenseket rögzítő mintatartók egymáshoz képest meghatározott helyzetűréssel le vannak kényszerezve,
- a dugattyúgyűrű az előterhelésnek megfelelő erővel a hengersizem felületének van szorítva,
- a dugattyúgyűrű görbületének finombeállítása az előterhelés alatt is lehetséges.

A fenti szempontok figyelembe vételével megkezdődött egy mintabeállító szerszám kidolgozása, amely alkalmazásával várhatóan csökkenthető az alkatrészek beállítása során fellépő pozicionálási hiba. A mintabeállító szerszám két fő eleme a hengerfal mintát rögzítő mintatartót befogadó bölcső és a dugattyúgyűrű mintát rögzítő mintatartót befogadó terhelő keret. A bölcsőben a mintatartó két finommegmunkált felületen fekszik fel, amely biztosítja annak reprodukálható illesztését. A mintatartó rögzítése a bölcsőben nyomatékra húzott illesztett szárú csavarokkal történik, amelyek az illesztőfelületeknek feszítik a mintatartót. A terhelő keret függőleges lineáris megvezetés mentén mozdítható el a bölcső fölött, amely lehetővé teszi a mintatartók ki- és beszerelését. A gyűrűt befoglaló mintatartó három szabadságfokkal rendelkezik, amelyek biztosítják a gyűrűmetszet síkbeli illesztését, lehetőségét a hengermetszet felületéhez képest, valamint a mintatartó elbillenését a hengermetszet hengeres felületének forgástengelyével párhuzamos tengely mentén. A tribológiai kísérlet során fellépő előterheléssel egyenértékű leszorító erő egy csigarendszeren keresztül függesztett kalibrált súly segítségével hat a terhelő keretre. A terhelő keret kialakítása lehetővé teszi a gyűrűmetszet mintatartóján található előfeszítő csavar meghúzását és leoldását – ezáltal a gyűrűmetszet görbületének finomhangolását – a keret leszorított állapotában.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás jelen állapotában a kitűzött célok közül az alábbiak teljesültek:

- A kidolgozott eljárással előállítható sorozatban gyártott motoralkatrészek preparálásával és/vagy szubsztraktív megmunkálásával a késztermékben (járműmotorban) megtalálható felületekkel és anyagokkal egyező minőségű kísérleti minta, amely alkalmas súrlódásmérő és koptató kísérleti berendezésen történő vizsgálatok folytatására.
- Az eljárás során jól közelíthető a motorban a dugattyúgyűrű-hengerfal alkatrészcsoporthoz a felső holtponthoz közeli helyzet környékén fellépő hőmérséklet és felületi nyomás, valamint kialakítható hasonló kenési állapot.
- Az eljárás végrehajtható a kenőolajok minősítése során használt ISO 19291:2016, DIN 51834-2, ASTM D6425 és ASTM D7421 szabványok által javasolt súrlódásmérő és koptató kísérleti berendezéseken.

A feltárt nehézségek kiküszöbölése által lehetőség nyílik a fennmaradó célok legalább részleges teljesítésére, ezzel olyan mérési módszert kialakítva, amely rövid idő alatt képes optikai és/vagy gravimetrikus úton meghatározható mértékű kopás előállítására, kellően robusztus eredményeket szolgáltat azonos minőségű minták esetén, valamint kellően érzékeny a különböző minőségű minták közötti különbségek kimutatásához.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- NAGY, A. L. – KNAUP, J. – ZSOLDOS, I.: A friction and wear study of laboratory aged engine oil in the presence of diesel fuel and oxymethylene ether, in: *Tribology – Materials, Surfaces&Interfaces*, 2019, 13:1, 20–30.
- NAGY, A. L.: Development of an artificial aging process for automotive lubricants, in: *Tavaszi Szél*, 2019, Konferencia, Budapest.
- NAGY, A. L. – ZSOLDOS I.: Artificial Aging of Ultra-low Viscosity Lubricant Samples on a Programmable Oil Aging Rig, in: JÁRMAI K. – VOITH K. (eds): *Vehicle and Automotive Engineering 3*, VAE 2020, Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore, 2021.
- OBERT, P. – MÜLLER, T. – FÜSSER, H.-J. – BARTEL, D.: The influence of oil supply and cylinder liner temperature on friction, wear and scuffing behavior of piston ring cylinder liner contacts – A new model test, in: *Tribology International*, 2016, 9., 306–314.
- OBERT, P. – MÜLLER, T. – FÜSSER, H.-J. – BARTEL, D.: Oil distribution and oil film thickness within the piston ring-liner contact measured by laser-induced fluorescence in a reciprocating model test under starved lubrication conditions, in: *Tribology International*, 2019, 129. , 191–201.