

Tribológiai kísérletek érzékenysége a felhasznált próbatestek pozícionálására

Sensitivity of tribological experiments to specimen positioning

Dr. Nagy András Lajos¹, Pepó Máté²

¹Járműhajtás Technológia Tanszék, Széchenyi István Egyetem,
Egyetem tér 1., H-9026 Győr, nagy.andras1@sze.hu, jhtt.sze.hu

²Járműhajtás Technológia Tanszék, Széchenyi István Egyetem,
Egyetem tér 1., H-9026 Győr

Abstract

Simplified component experiments on a tribometer provide cost-effective testing methods for investigating the indirect effects of alternative fuels on tribological systems. These experiments assess how lubricant properties and conditions impact friction and wear under controlled environmental variables. However, post-machining deformation and relaxation, coupled with errors in parallelism and concentricity of test samples extracted from series production parts complicate specimen positioning for conformal contact. This study aims to assess how positioning inaccuracies during specimen setup affect the resulting contact surface quality through numerical simulation.

Keywords: friction and wear, contact simulation, sample deformation, contact surface, wear pattern

Kivonat

A tribométeren végzett komponenskísérletek költséghatékony módszereket kínálnak az alternatív üzemanyagok tribológiai rendszerekre gyakorolt közvetett hatásának vizsgálatára. Ezen kísérletek a kenőanyag tulajdonságainak súrlódásra és kopásra gyakorolt hatását minősítik ellenőrzött peremfeltételek mellett. Ugyanakkor a sorozatgyártású alkatrészekből származó kísérleti minták megmunkálást követő deformációja, relaxációja, valamint párhuzamossági és koncentricitási hibái nehezítik a mintapozícionálást, illetve a konform érintkezés kialakítását. Jelen tanulmány célja a pozícionálási pontatlanság hatásának vizsgálata a mintabeállítás eredményeként létrejövő érintkezési felületre numerikus szimuláció segítségével.

Kulcsszavak: súrlódás és kopás, kontakt szimuláció, minta deformáció, kontakt felület, kopáskép

1. BEVEZETÉS

Az alternatív üzemanyagok egyre növekvő alkalmazása mellett kiemelt fontosságú kutatási feladat a különböző üzemanyag formulációk, a globális gépjárműflotta, illetve a kenőolajok kompatibilitásának vizsgálata. Az alternatív üzemanyagok közvetett hatásainak megértésével elkerülhető a kenőolaj korai tönkremenetele, amely hatással lehet a belsőégésű motorok tribológiai alrendszerének súrlódási veszteségeire és kopására. A tribológiai rendszerek vizsgálatának hatékony módszere az egyszerűsített komponenskísérlet, amelyet jellemzően kísérleti célberendezéseken – tribométereken – végeznek. A tribométer mint költséghatékony tesztplatform lehetővé teszi a tribológiai rendszer egyes tulajdonságainak vizsgálatát, többek között például a felületi keménység, érdesség, üzemállapotok vagy kenőanyagok megváltozása által okozott súrlódás és kopásváltozás számszerűsítését. A fizikai-kémiai kenőolaj tulajdonságok alternatív üzemanyagok által okozott változásainak értékelése a klasszikus kenőolajvizsgálatokon túl szintén kiegészíthető tribométeren végzett kísérletekkel. A tribométeren végzett súrlódás és kopásvizsgálatok tájékoztatást adnak a kenőolaj megváltozott kenőképességéről, határréteggépző képességéről, illetve kopáscsökkentő képességéről.

A tribométer kísérleteket esetében a kísérleti változók – felületi és kenőanyag hőmérséklet, terhelés, relatív sebesség, időtartam, felületminőség, kenőanyag – mellett a környezeti változók – pl., páratartalom, laborhőmérséklet, operátor – is jelentős mértékben befolyásolják a végeredményt, ezért ezek szabályozása kiemelt fontosságú a kísérletek során, ismerete pedig elengedhetetlen az eredmények értékelése és értelmezése szempontjából. A kísérletek elvégzése során alkalmazható kifejezetten kísérleti célra gyártott, ellenőrzött

paraméterekkel rendelkező mintadarab, mellyel a kísérlet megismételhetősége, valamint az eredmények megbízhatósága nagy mértékben javítható. Ezen a szabványosított minták azonban jellemzően nem képesek reprezentálni egy komplex rendszer meghatározott alrendszerének – pl. a belsőégésű motor dugattyúgyűrű-hengerfal kapcsolatának – elemeit, mivel a lehető legszélesebb körű felhasználhatóság érdekében általános csapágy anyagból készülnek, egy keménységre és felületminőségre. A sorozatban gyártott alkatrészekből készített kísérleti minták esetében szavatolható az anyagminőség, érdesség, felülettopológia, illetve keménység egyezősége a reprezentált rendszerben tapasztalható értékekkel, azonban ezen minták esetén lényegesen összetettebb feladat a kísérleti minták megfelelő illeszkedését biztosító beszerelése. A konform illeszkedés biztosítását a dugattyúgyűrű-hengerfal rendszerből preparált minták esetében az alábbi jelenségek nehezítik:

- a dugattyúgyűrű jellemzően nem a beépítési állapotában tapasztalható méretre készül, a megfelelő előfeszítő erő biztosítása érdekében alakja eltér az ideális körgyűrűtől, rádiusza nagyobb, mint a befogadó hengerfurat rádiusza,
- a hengerfalat tartalmazó hengertömb a funkciója ellátása érdekében nem tökéletesen tömör, a kimunkálás során a mintadarabban előfordulhatnak furatok és üregek,
- a hengertömbben a gyártást követő minimális maradó feszültségek jellemzően nem okoznak számottevő deformációt, azonban a kimunkált, számottevően kisebb méretű mintadarab esetében az okozott deformáció mértéke befolyásolhatja az érintkezési felületet.

A kimunkálás során a maradó feszültségek következtében fellépő deformáció, valamint a beállítás során a megfogás által okozott deformáció jelenlétében a konform érintkezés biztosítása sok esetben jelent kihívást az operátor számára.

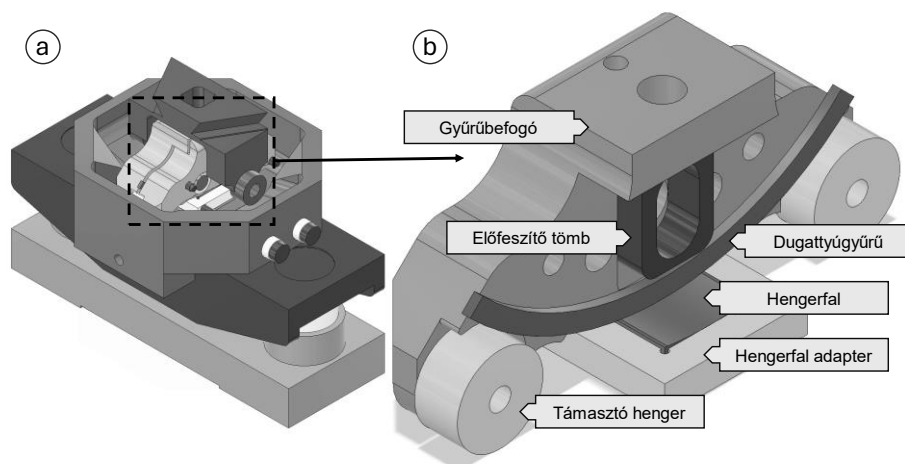
A jelenlegi tanulmány részeredményeket mutat be a mintabeállítással kapcsolatos kihívások leküzdésére tett erőfeszítések vonatkozásában. Véges elemes numerikus szimuláció segítségével kerül meghatározásra az érintkezési felület minősége, amely a gyakorlatban tapasztalt kopásképekkel kerül összehasonlításra. A kutatás hosszútávú célja egy olyan mintaelőkészítő folyamat, amely során előszűrhetők a korrigálhatatlan mértékű deformációval terhelt minták, valamint számítógépes modellezéssel és szimulációval segíthető a mintabeállítás folyamata.

2. MÓDSZEREK ÉS ESZKÖZÖK

2.1. Kísérleti módszertan

A tanulmányban hivatkozott kísérleti módszertan részben saját fejlesztésű, részben szabványos elemek házasításából született meg. A kísérlet célja a súrlódási állapotok és kopásfolyamatok megértése, valamint a súrlódási együttható és a kopás mennyiségének számszerűsítése az alternáló mozgást végző dugattyúgyűrű-hengerfal tribológiai rendszerben különböző állapotú kenőolajok jelenlétében. A kísérletekhez sorozatban gyártott alkatrészekből preparált mintadarabok kerültek felhasználásra. A minta megmunkálása során huzalszikra forgácsolással biztosítottuk a hengertömbből származó kísérleti alkatrészek lehető legmagasabb fokú precizitását. A dugattyúgyűrűket precíziós vágóberendezéssel vágtuk méretre. Az elkészített mintadarabok a megmunkálást követően több lépcsős tisztítási folyamaton estek át egy ultrahangos mosóberendezésben szerves oldószeres fürdőben. A letisztított alkatrészek ezt követően kerültek beszerelésre a tribométer mintatartóiba. Az 1. ábrán szemléltetett dugattyúgyűrű mintatartó biztosítja a gyűrű konform érintkezését a hengerfallal. Ehhez a gyűrű beszerelésre kerül a mintatartóba, majd az előfeszítő tömb és egy hernyócsavar segítségével beállításra kerül a megfelelő mértékű előfeszítés. A konform érintkezést továbbá két támasztóhenger biztosítja, ezek, illetve az előfeszítő tömb három pontos stabil megtámasztással rögzítik a gyűrűt és adják meg annak beépítési rádiuszát.

A beépítést követően a gyűrű egy beállító szerszám segítségével nyeri el a kísérlet során állandó rádiuszát. Ehhez a hengerfalat, valamint gyűrűt a befogóval együtt rögzítettük a beállító szerszámban. A szerszám lehetővé teszi, hogy 50 N statikus terhelés adódjék a gyűrűbefogóra, így előterhelt állapotban történhet meg a gyűrű rádiuszának finombeállítása. A finombeállítás az előfeszítő tömböt mozgó hernyócsavar meghúzásával, közben pedig a gyűrű és a hengerfal közötti fényrés szemrevételezéses ellenőrzésével történik. A beállítás akkor tekinthető megfelelőnek, ha a két alkatrész közötti fényrés megszűnik.



1. ábra. Dugattyúgyűrű és hengerfal mintákat rögzítő mintabefogók CAD modellje (a), a beállítást befolyásoló részegységek kiemelésével (b); jelen tanulmányban az ábrán látható adapterrel illesztett 12 mm széles hengerfal helyett 20 mm széles hengerfal minták kerültek felhasználásra

A kísérletek első szakaszában az ASTM G181-21 [1] szabvány szerinti bejáratási folyamat kerül végrehajtásra, amely lépcsőzetesen növekvő és csökkenő terhelésű szakaszokból áll. A szabvány nem tesz ajánlást a folyamat hosszát illetően, hanem előírja, hogy a folyamat akkor tekinthető lezártnak, ha az egymást követő növekvő és csökkenő terhelésű szakaszokban azonos terhelés mellett mért súrlódási együtthatók értéke kellően jól közelíti egymást, azaz nem mutat számottevő eltérést. A sikeres bejáratást követően a tribológiai kísérletben használt alkatrészeket adó közvetlen befecskendezéses turbófeltöltött benzinmotor közepes terhelésű munkapontjának megfelelő terhelő erőt, hőmérsékletet, és felsőhőtpont közeli dugattyúsebességet szimuláló terhelési kollektívával folytatódik a vizsgálat.

2.2. Szimulációs módszertan

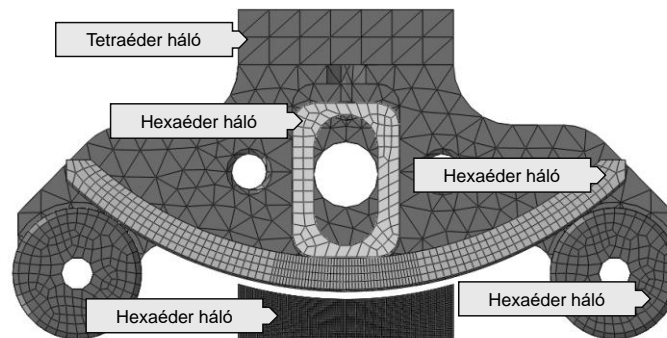
A jelen tanulmányban bemutatott véges elemes szimulációs modell [2] az 1. ábrán látható, egyszerűsített alkatrészszámmal rendelkező összeállítás alapján készült el. Az 1. ábrán szemléltetett felépítmény a tanulmányban tárgyalt kísérleteknél alkalmazott 20 mm szélességű hengerfal minta helyett 12 mm széles mintákat alkalmaz. Az egyszerűsített modell lehetőséget biztosított arra, hogy rövid idő alatt elvégezzük a koncepció vizsgálatát, illetve hálózatkészítés vizsgálatot is végezzünk. Az így összeállított modell legfontosabb paramétereit az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat Egyszerűsített szimulációs modell legfontosabb paramétereit

Elemszám és típus	Összesen 114308 csomópont és 1011293 elem <ul style="list-style-type: none"> • 95677 elsőfokú C3D8R elem • 5616 másodfokú C3D10 elem
Anyagmodell	Lineáris acél modell <ul style="list-style-type: none"> • 7,85 kg/m³ sűrűség • 200 GPa Young modulus • 0,29 Poisson tényező

A hálózott modell lineáris 3D 8 csomópontú redukált integrációs formulát alkalmazó (C3D8R) tetraéder, illetve másodfokú 3D 10 csomópontú (C3D10) hexaéder elemekből áll. A hálózott véges elemes modellt a 2. ábra szemlélteti, melyen jól látható az érintkezési felület szélességében kisebb elemmérettel rendelkező térfogat a gyűrű esetében. A szimulációban modellezett gyűrű és hengerfal ideális geometriát feltételezve készült el, a névleges hengerfurat rádiuszát alkalmazva. A modellen a hengerfal, valamint a dugattyúgyűrű is merev megfogásokkal rendelkezik, csak a szükséges elmozdulások irányában nincsenek lekötve a rendszer szabadságfokai. A szimuláció során 3 lépésben épül fel a terhelési állapot:

1. lépés – az előfeszítő tömb érintkezésbe lép a gyűrű hátoldalával,
2. lépés – a hengerfal érintkezésbe lép a gyűrű futófelületével,
3. lépés – az előfeszítő tömb további 0.1 mm-rel elmozdul a gyűrű felülete felé.

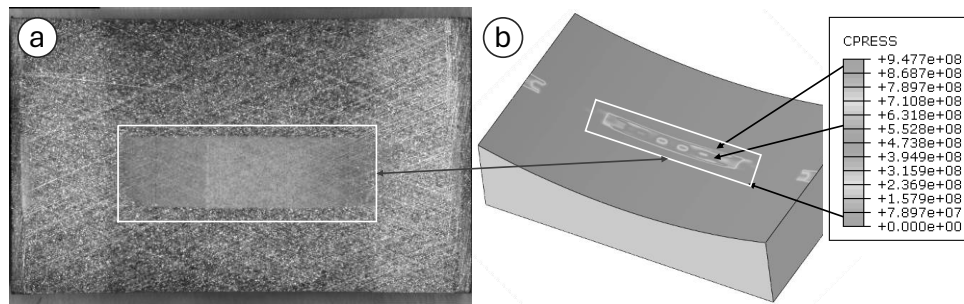


2. ábra. Egyszerűsített véges elemes hálózott modell, az egyes alkatrészek hálótípusának feltüntetésével

A terhelő erő elmozdulással történő előidézése, valamint a szimulációban alkalmazott megfogásokkal előidézett virtuális elridegítés olyan praktikus megfontolások eredményei, amelyekkel a tervezett koncepcióvizsgálat időszükséglete lerövidíthető volt. Ezek azonban feltételezhetően megmásítják az eredményt – a fellépő felületi feszültség értéke nem pontos –, ezért a későbbiekben a részletes modell felépítése során ki fogjuk küszöbölni ezeket az absztrakciókat.

3. EREDMÉNYEK

Az egyszerűsített modellel nyert első eredmények alapján elmondható, hogy az egyszerűsítések ellenére a modell képes jól leképezni a hengerfal minta felületén kialakuló érintkezési felületet. A 3. ábra bal oldalán egy dugattyúgyűrű-hengerfal alkatrészpáron elvégzett tribométeres kísérlet eredményeként létrejött kopáskép kerül bemutatásra. Jól látható, hogy a gyűrű felületén nem egy összefüggő, egyenletes kopásnyom alakult ki, a gyűrű az alkalmazott beállítási eljárás ellenére csak a hengerfal közepén ért le (bekeretezett terület). A 3. ábra jobb oldalán a kontaktszimuláció eredményeként létrejött felületi nyomás értékeket szemléltető képrészlet jól mutatja, hogy a valósággal megegyező jellegű érintkezési felület alakult ki.

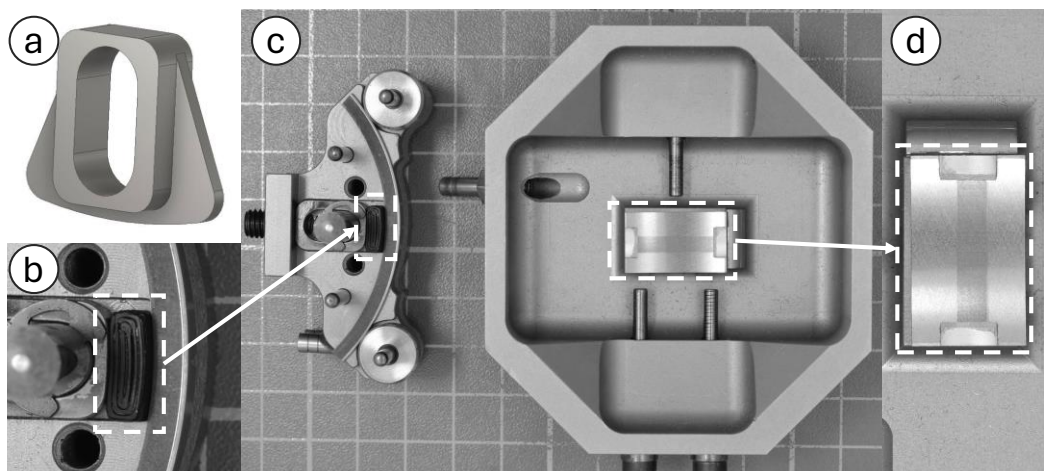


3. ábra. Kísérleti mintadarab felületén képződött kopásnyom (a), valamint a kontaktszimuláció eredményeként létrejött felületi nyomás eloszlás Pa-ban (b); a szimuláció eredménye jól közelíti a valóságban tapasztalt érintkezési felületet

A két kopáskép legnagyobb kiterjedésére merőleges irányú méretében tapasztalható eltérés annak tudható be, hogy míg a kísérlet során a gyűrű 3 mm úthosszon alternáló mozgást végzett a hengerfalon, addig a véges elemes szimulációban nem volt figyelembe véve a mozgás. A vizsgálat célja nem a kopás szimulációja volt, hanem a kialakuló kontaktfelület vizsgálata, és ennek korrelációja a kísérleti kopásképpel. Ez a megfontolás korlátozottan alkalmazható, hiszen a kopásfolyamat előrehaladtával, illetve mindkét alkatrész elkopásával feltételezhetően a teljes felület szélességében elterülő kopásnyom alakul ki. A vizsgálat végző célja ennek az egyenletesen bekapott állapotnak az elérése úgy, hogy az ehhez alkalmazott terhelést ne kelljen szélsőséges, illetve irreális értékekre növelni, illetve a kísérlet időtartam se emelkedjen néhány száz óránál magasabb értékre.

A szimuláció eredménye rámutatott arra, hogy még ideális geometriákat feltételezve sem képes a jelenleg alkalmazott mintabefogó megfelelő konformitású felületi érintkezést biztosítani, így ennek áttervezése

vált szükségessé. Az eredmények alapján az előfeszítő tömb felfekvő felületének módosítására került sor, amely lehetővé tette az egyenletesebb felületi nyomáeloszlás kialakulását az érintkező alkatrészek között, nem csak a szimulált modellkörnyezetben, de a kísérleti kopásképek esetében is. A 4. ábra a módosított előfeszítő geometria számítógépes modelljét (a), a módosítás hatásvizsgálatához felhasznált 3D nyomtatott prototípus alkatrészt (b), a prototípus elhelyezését a kísérletnél használt mintabefogó szerszámban (c), valamint a prototípus alkalmazásával nyert egyenletes kopásnyomot (d) szemlélteti. A 4. ábrán egy keskenyített futófelületű hengerfal szegmens látható, amely szintén a felületi érintkezés konformitásának növelésére tett törekvések egyik eredménye, azonban önmagában a futófelület 20 mm-ről 16 mm-re csökkentése nem eredményezett számottevő javulást a kopásnyomok jellegében.



4. ábra. Javasolt módosított előfeszítő tömb modellje (a), a koncepció vizsgálatára készített prototípus alkatrészt (b), a kísérleti elrendezést szemléltető mintabefogó szerszámok (c), illetve a módosított előfeszítő blokkal szerelt kísérleti összeállítással kapott egyenletes kopásnyomot (d); a 20 mm-ről 16 mm-re keskenyített futófelületű hengerfal minta önmagában nem járult hozzá a kopásnyom jellegének megváltozásához

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen tanulmányban véges elemes numerikus szimuláció alkalmazásával került sor a felületi érintkezés, illetve a kialakuló kontaktnyomás vizsgálatára tribométeren végzett kopáskísérletekben alkalmazott dugattyúgyűrű és hengerfal kísérleti minták esetében. A vizsgálatokhoz használt kísérleti minták, egy sorozatban gyártott turbófeltöltött közvetlen befecskendezéses benzinmotorból lettek kimunkálva. A kísérlet során alkalmazott terhelési kollektíva a motorban részterhelésen fellépő állapothoz igazodnak. A kísérletek során egyenetlen, szakadozott kopásnyomokat tapasztaltunk, ezért egy egyszerűsített numerikus modellt alkalmazva megvizsgáltuk, hogy feltárható-e az egyenetlenség oka véges elemes szimuláció útján.

Az egyszerűsített modellel tapasztalt felületi nyomáeloszlás eredmények az absztrakciók ellenére jó egyezést mutattak a kísérleti mintákon tapasztalt kopásképekkel. A számítással meghatározott kontaktnyomás valószínűtlenül magas, amely betudható a modellben alkalmazott megfogásoknak, illetve a terhelés felépítés módjának, melyeket a jövőbeli szimulációk esetén pontosítani szükséges. Az eredmények segítségével sikerült azonosítani a minták megfogásához alkalmazott előfeszítő tömb alkalmatlanságát, melynek módosításával egyenletesebb nyomáeloszlás értékeket sikerült elérnünk a szimulációban, valamint a javasolt módosítás egy változatát alkalmazva sikerült a kísérleti kopásképek homogenitását is javítani.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] ASTM Standard G181-21, *Standard Test Method for Conducting Friction Tests of Piston Ring and Cylinder Liner Materials Under Lubricated Conditions*, ASTM International, West Conshohocken, PA., 2021
- [2] Pepó M., *The examination and simulation of piston ring and cylinder wall specimens used in tribological tests*, Master's Thesis, Széchenyi István University, Győr, 2022