

KENT ACÉL FELÜLETPÁROK SÚRLÓDÁSÁNAK VIZSGÁLATA

FRICITION ASSESMENT OF LUBRICATED STEEL PAIRS OF SURFACES

Németh Géza MSc,
adjunktus
Miskolci Egyetem
Gép- és Terméktervezési Intézet

ABSTRACT

The coefficient of kinetic friction is a random variable. Its value is governed by a huge number of circumstances. Studying some widely known methods, one of them was improved and made applicable to analyse the rolling resistance of antifriction bearings. The rolling resistance depends mainly on the load, the type of supplied lubricant, the number of speed and the service temperature. Although the suggested test rig is currently under development, it seems to be able to select the proper lubricant for the given installation environment and operation conditions.

1. BEVEZETÉS

A súrlódási tényező nagyon sokféleképpen elemezhető. Természetesen mondhatjuk, hogy a Coulomb-féle súrlódási törvény igaz, mely szerint légköri viszonyok között a súrlódási tényező az egymással érintkező, egymáshoz képes elmozduló felületek anyagminőségétől függ. Ezt a jól ismert szemléletet az elmúlt évszázadban igen sokan, igen sok szempont figyelembe vételével árnyalták. Csak néhányat kérdést említenék ezek közül, vizsgálatainkat acél felületekre szűkítve.

1. Van-e valamilyen közeg (fluidum, szilárd anyag, esetleg szilárd bevonat vagy mindkettő a kérdéses felületek között)?
2. Milyen fizikai-kémiai állapotúak a felületek? A légköri viszonyoknak megfelelő technikai felülettel van dolgunk, vagy tiszta alapfém felülettel, módosult alapfémmel, fém-oxigén szilárd oldattal, szennyezett felülettel? Milyen erősen kötődnek egymáshoz az egyes rétegek?
3. A felületek érdessége, a felületek között ható normálerő nagysága mekkora? A köztük lévő fluidum és bevonat, a csúszási sebesség együttesen milyen súrlódási állapotot hoz létre?
4. Milyen a környezeti nyomás és hőmérséklet?
5. Milyen járulékos folyamatok jelentkeznek (kopás, melegedés) és milyen mértékben?

Ezeknek az egyszerű kérdéseknek a figyelembe vétele csak több szakterület együttműködésével lehetséges. Számptalan szakkönyv, pl. [1], tudományos értekezés [2] készült a témában, felhasználta a méréshez és modellezéshez a kor műszaki színvonalán rendelkezésre álló lehetőségeket. Dolgozatunk célja, hogy bemutasson néhány általános és célzott kísérleti lehetőséget a gépelemek között fellépő súrlódási viszonyok tisztázására, és szerény mértékben hozzájáruljon a mérési tapasztalatok bővítéséhez.

2. A SÚRLÓDÁSI TÉNYEZŐ MEGHATÁROZÁSA

Valamilyen fizikai elv alapján végezhetjük a súrlódási tényező mérését. A módszer lehet általános, de korlátozódhat egy kinematikai párra is. Egy-egy jól ismert általános elvet mutat a 2. és 3. ábra, a nyugvó illetve a mozgó súrlódási tényező meghatározásához. Előbbi szögmerésen, utóbbi erőmérésen alapul. A 3. ábra egy mozgató orsó-anya kapcsolat súrlódási viszonyainak tisztázására szolgáló elvet mutat be [3]. Segítségével megállapítjuk a teheremelés

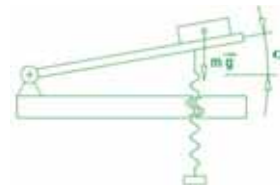
illetve a teher süllyesztés nyomatékigényét, az ismert számító modell szerint pedig a súrlódási tényező értékét az orsó-anya kapcsolatban. Az ábrán jelölt \vec{F} erővektor magába foglalja az orsó, a kötéldob és a teher súlyerelyét. A fokozatosan növelt m tömegek által létrehozott erőpárnak a D átmérőjű kötéldobon létrehozott nyomatéka győzi le a menetsúrlódási nyomatékot, és indítja meg az orsó forgását. Jobb menetű orsó esetén az ábrán vázolt összeállításnak a teheremelés esete felel meg. A nyomatékegyensúlyt az (1) összefüggés fejezi ki, azaz

$$Dmg = F \frac{d_2}{2} \operatorname{tg}(\rho' + \alpha), \quad (1)$$

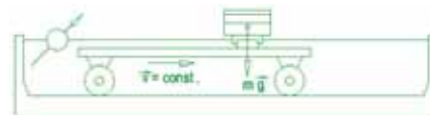
melyből a μ_0 nyugvó súrlódási tényező a d_2 középtátmérő, az α menetemelkedési szög és a β menetprofilszög ismeretében a

$$\mu_0 = \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \operatorname{tg}\left[\operatorname{arctg}\left(\frac{D}{d_2} \cdot \frac{2mg}{F}\right) - \alpha\right] \quad (2)$$

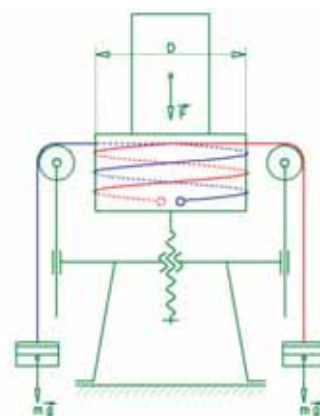
összefüggéssel számítható.



1. ábra Nyugvó súrlódási tényező mérése

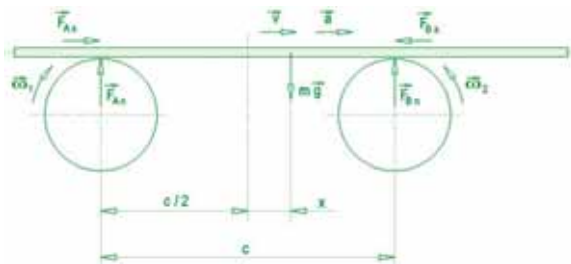


2. ábra Mozgó súrlódási tényező mérése



3. ábra Mozgatóorsó – anya kapcsolat súrlódás mérése [3]

Léteznek egyéb mérési módszerek, ilyen a harmonikus rezgőmozgás elvén működő. Tekintsük a jól ismert elvet, az egymástól c távolságra lévő, egymással szemben forgó tárcsákra helyezett vízszintes helyzetű rúd mozgásviszonyait a 4. ábra segítségével. Az erővektorok a rúdra irányulókat jelölik.



4. ábra Forgó tárcsákra helyezett vízszintes rúd erő és mozgásviszonyai [3]

3. A FELHASZNÁLT MÉRÉSI ELV

A 4. ábra feladatára felírható homogén másodfokú lineáris differenciálegyenlet a tárcsák és a rúd közötti μ súrlódási tényező, a x elmozdulás és idő szerinti differenciáljai, valamint a c tengelytávolság esetén

$$\ddot{x} + \frac{2\mu g}{c}x = 0. \quad (3)$$

ahol az x elmozdulás tényezőjét ω^2 -tel jelölve a megoldás

$$x(t) = \alpha \cos(\omega t) + \beta \sin(\omega t) \quad (4)$$

alakban kereshető. A fenti $x(t)$ valóban megoldása az egyenletnek, ahol a kezdeti feltételekkel ($t=0$ esetén $x(t) = \alpha$ és $\dot{x}(t) = 0$ miatt $\alpha = 0$) a harmonikus rezgőmozgás elmozdulás függvénye

$$x(t) = \alpha \cos(\omega t). \quad (5)$$

A mozgás legnagyobb kitérése (amplitudója) α , körfrekvenciája pedig

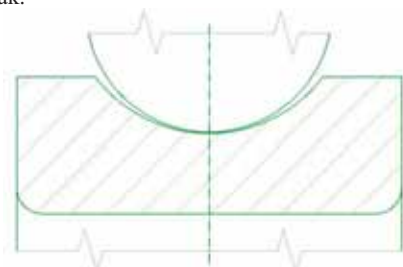
$$\omega = \sqrt{\frac{2\mu g}{c}}. \quad (6)$$

A mozgás T periódusidejének ismeretében a súrlódási tényező

$$\mu = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \frac{c}{2g}. \quad (7)$$

4. A MÉRŐESZKÖZ MEGVALÓSÍTÁSA

Az elvi megoldás gyakorlatba illesztése feltételezi a rezgőmozgást végző vízszintes helyzetű rúd oldalirányú vezetését. Mélyhornyú golyóscsapágy belső gyűrűire helyezett kör keresztmetszetű rúd alkalmas erre, a görbületi viszonyok az 5. ábrán láthatóan a golyóscsapágyéhoz hasonlóak.



5. ábra Mélyhornyú golyóscsapágy görbületi viszonyai

A 6312 jelű csapágy belső gyűrűjén a futópálya főgörbületi sugarai $36,4 \text{ mm}$ és $11,5 \text{ mm}$, a golyók átmérője $22,2 \text{ mm}$. Ezek szerint a legfeljebb 22 mm átmérőjű rúd a $72,8 \text{ mm}$ átmérőjű tárcsákra illeszkedik.

Érdemes a támaszközt növelni a rúd kiegyensúlyozottabb támasztása érdekében. A mérési elv leírásából illetve (7) eredményéből következik, hogy földi körülmények között,

álló forgástengelyű tárcsák esetén a mérés eredménye csak a támaszköztől függ. A tárcsák fordulatszámától független, így azok akár különbözhetnek is egymástól. Száraz súrlódás, kis fordulatszám, normál légköri és hőmérsékleti viszonyok között e megállapítás igazsága valószínűsíthető. Az egyszerűség, továbbá a mérés körülményeinek későbbi kiterjesztése miatt azonban az egymással szemben forgó tárcsák fordulatszámát mindenképpen azonosra választjuk. Négy darab azonos fogszámú fogaskerék sorba kapcsolásával a szélsők egymással ellentétes forgásiránya és azonos fordulatszáma biztosítható [3].



6. ábra A tárcsák elkészült hajtáslánca

A megfelelő irányú behajtás pedig a rúd befelé terelését. A 6. ábrán látható hajtáselrendezésben a 3. fogaskereket az óramutató járásának megfelelően hajtva alakulnak ki az igényelt mozgásviszonyok. A mozgás legnagyobb kitérését a kezdeti feltétel szerint állíthatjuk be $0 < \alpha < c/2$ értékre. A rezgőmozgás könnyebb érzékelése illetve a rúd egyensúlyának biztosítása érdekében nem választhatunk a tartomány széleihez közeli értéket.

Száraz súrlódás esetén a súrlódási tényező értéke a környezeti hőmérséklet és nyomás függvényében a $10^{-1} < \mu < 10^1$ tartományban várható [1]. Legyen ekkor a mozgás periódusideje a $2,5s > T > 0,25s$ tartományban. Ez a periódusidő tartomány a rezgésnek akár szemrevételezéssel történő pontos érzékelését teszi lehetővé. (7) szerint ehhez $c \approx 0,3106 \text{ m}$ tengelytávolság tartozik. A 6. ábrán látható elemi egyenes fogazatú fogaskerekek fogszáma $z = 34$, modulja pedig $m = 3 \text{ mm}$. A két tárcsa tengelytávolsága ezek szerint $c = 3a = 3zm = 306 \text{ mm}$, mely teljesíti az előbbi feltételt.

5. LEHETSÉGES MÉRÉSI KÖRÜLMÉNYEK

A mérőeszköz eredetileg száraz súrlódás esetén képes a csúszó súrlódási tényező meghatározására. A meghajtás módjára érzéketlen, a fordulatszámra és a csapágyazások ellenállására ugyancsak. A súrlódási tényező gyakorlati értékei esetén érvényes, viszonylag nagy periódusidő a légellenállás befolyását is elhanyagolhatóvá teszi. A súrlódási tényezőt csökkentő bármely körülmény (pl. kenés) növeli a T periódusidőt, ami számunkra kedvező.

Száraz súrlódás esetén az alacsony hőmérséklet és a vákuum jelenléte befolyásolja erősebben a csúszó súrlódási tényező értékét. A csúszási sebesség és a görbületi viszonyok hatása nem jelentős. Kent felületek esetén viszont minden olyan egyéb tényezőt is figyelembe kell vennünk, mely a kenési állapotot befolyásolhatja. Ezek közül a legfontosabbak:

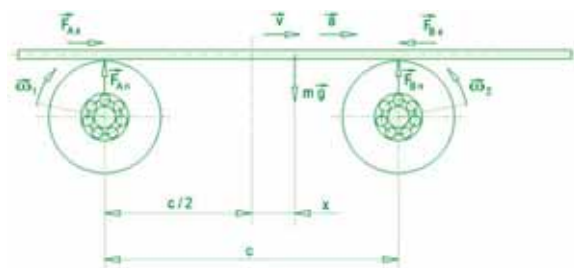
- A kenőanyag halmazállapota
 - o légnemű,
 - o folyékony,
 - o konzisztens,
 - o szilárd,
- A kenőanyag egyéb jellemzői
 - o viszkozitás
 - o konzisztencia
 - o időfüggő reológiai tulajdonságok
- A kenőanyag adalékolása,
- A tárcsa futófelület és a rúd érdessége, mintázata,
- A tárcsa és rúd görbületi viszonyai,
- A tárcsák kerületi sebessége,
- A felületek terhelése,
- Esetleges szilárd felületi bevonatok.

A fenti tényezők egymásra hatása nagyon jelentős, így a vizsgálati lehetőségek igen széleskörűek. A teljesség igénye nélkül említenénk néhány érdekes esetet.

- Igen kis falvastagságú acélcső és igen nagy kerületi sebesség esetén aerodinamikus kenőállapot is kialakulhat a felületek között. Ekkor a súrlódási tényező jóval a $\mu = 10^{-1}$ érték alá csökkenhet, mely a harmonikus rezgőmozgás T periódusidejének jelentős növekedésével jár.
- Folyadéksúrlódás esetén is lényeges a kerületi sebesség, hiszen a súrlódási állapotot a kenőanyag viszkozitása, az érdes felületek legnagyobb kiemelkedése és a felületek terhelése is befolyásolja.
- Zsírkénés esetén, alacsony hőmérsékleten a kenőzsírt képező alapolaj viszkozitásának növekedése mellett a kenőzsír konzisztenciája is növekszik. Időre van szükség a kenőanyag megfelelő eloszlásához, a megfelelő kenőképesség kialakulásához. Amíg a kenési állapot hiányos, a fémfelületek biztonságos elválasztása sem valósul meg.
- Bizonyos lágyfém bevonatok súrlódás csökkentő hatása csak nagyobb terhelés esetén érvényesül [4], ezért ennek kimutatásához meg kell teremteni a terhelés fokozatos növelésének lehetőségét. Legegyszerűbb talán a kellően merev rúdnak a közepén és a végein történő pótlólagos terhelése úgy, hogy a terhelés szimmetriája megmaradjon. A légellenállás nem növekedhet számottevően, ha a csillapítatlan rezgőmozgás feltételeit akarjuk továbbra is biztosítani.

6. A MÉRÉSI ELV KITERJESZTÉSE

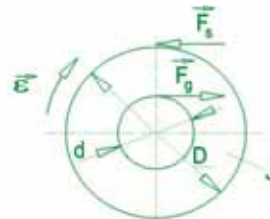
A 4. ábrán bemutatott elv és a 6. ábrán látható kísérleti berendezés feltételezi, hogy a négy azonos fogszámú fogaskerék az első és utolsó tengelyen lévő tárcsák fordulatszámát egyértelműen meghatározza, állandó hajtó fordulatszám esetén a tárcsák és a rezgőmozgást végző rúd között az átlagos csúszási sebesség is állandó lesz. Módosítsuk ezt az elvet, tegyük alkalmassá a mérő berendezést gördülőcsapágyak gördülési ellenállásának mérésére, illetve a kenőanyagok és a környezeti hőmérsékletnek a gördülési ellenállásra gyakorolt hatásának tanulmányozására. A 7. ábra mutatja a módosult elvet.



7. ábra A tárcsákat csak a csapágyellenállás forgatja

Az eredeti feladattal szemben itt csak a csapágyak belső gyűrűit forgatjuk, a csapágy külső gyűrűi és a tárcsák csak a gördülési ellenállás miatt fognak elfordulni. A gördülési ellenállásokat a rúd tömegéből az egyes tárcsákra eső részen kívül a tárcsák tömege is befolyásolja. A tárcsák és a rúd között fellépő súrlódó erő nagyságrendekkel nagyobb, mint a csapágyak gördülési ellenállási tényezője, továbbá jóval nagyobb karon hat a súrlódó erő, mint a gördülési ellenállás, ezért a rúd nem fog megcsúszni a tárcsákon. Ha a rúd gyorsul, akkor a tárcsák szöggyorsulása ezzel egyértelmű kapcsolatba hozható. Az is egyértelműsíthető, hogy a két tárcsa szöggyorsulása nagyság és irány szerint is megegyezik, a tárcsák és a rúd közötti tiszta gördülések miatt. Nem csak a

rúd, hanem a tárcsák is harmonikus mozgást fognak végezni, és várhatóan itt is csillapítatlan lesz a rezgés. Hogy ezt belássuk, írjuk fel a bal oldali tárcsa mozgásegyenletét. Segítségül a 8. ábra szolgál, a d és D átmérők, a J tehetetlenségi nyomaték, a külső nyomatékot adó F_s és F_g kerületi erők és az ε szöggyorsulás feltüntetésével.



8. ábra Adatok a bal oldali tárcsa mozgásegyenletéhez

A rúdról a tárcsára lefelé ható normálerő a 4. ábra x pillanatnyi kitérésű rúdja esetén

$$F_n = \left(\frac{1}{2} - \frac{x}{c} \right) mg, \quad (8)$$

a csapágygolyókról a külső csapágygyűrűre felfelé ható normálerő pedig a (8)-hoz képest kiegészül a tárcsa és a külső csapágygyűrű együttes $m_t g$ súlyerejével. A külső erők nyomatékai és a gyorsítónyomaték egyenlőségét kifejező egyenlet a bal oldali tárcsa esetén, a 8. ábra jelöléseivel

$$\frac{d}{2} F_g - \frac{D}{2} F_s = J \varepsilon, \quad (9)$$

melyből az F_s súrlódó erő kifejezhető, és ennek az értéke sokkal kisebb, mint 4. ábra feladata esetében. A gördülő ellenállás a kiegészített (8) egyenletből

$$F_g = \mu_g \left[\left(\frac{1}{2} - \frac{x}{c} \right) mg + m_t g \right]. \quad (10)$$

A x pillanatnyi kitérésű rúd $\ddot{x} = \varepsilon D/2$ pillanatnyi gyorsulásával és a (10) egyenletet (9)-be történő behelyettesítésével a tárcsa kerületén ható súrlódó erő

$$F_s = \frac{d}{D} \mu_g g \left[\left(\frac{1}{2} - \frac{x}{c} \right) m + m_t \right] - \frac{2}{D} J \varepsilon \quad (11)$$

alakban nyerhető. A jobboldali tárcsára a súrlódó erő kifejezése ehhez hasonló, az említett azonos irányú és nagyságú szöggyorsulás miatt, de képletben minden előjel pozitív. A vízszintes rúd mozgásegyenletét a vízszintes rúdra felírt Newton II. törvénye adja, és a (3) alakhoz hasonló

$$\ddot{x} + \frac{\frac{d}{2} \mu_g g}{1 + \frac{8J}{D^2 m}} x = 0 \quad (12)$$

homogén másodrendű differenciálegyenlet lesz.

Az egyenletben az előző egyszerűbb esettől eltérően szerepel még a rúd m tömege, a tárcsák tehetetlenségi nyomatéka és a tárcsák átmérői. A tárcsák tehetetlenségi nyomatékába bele kell érteni a vizsgált golyóscsapágy külső gyűrűjének tehetetlenségi nyomatékát is.

A harmonikus rezgőmozgás T periódusideje itt is mérhető, így a rezgés körfrekvenciája, $\omega = 2\pi/T$ szerint számolható. Végül a csapágy gördülési ellenállási tényezője

$$\mu_g = \frac{D}{d} \left(1 + \frac{8J}{D^2 m} \right) \omega^2 \frac{c}{2g}. \quad (13)$$

A számításban az egyedüli bizonytalanságot a tárcsák és a vizsgált golyóscsapágy külsőgyűrű együttes tehetetlenségi nyomatékának meghatározása okozza.

7. A FELHASZNÁLT MÉRÉSI ELV GYAKORLATI ALKALMAZÁSA

A 6. ábrán bemutatott elemek a 4. ábra elvi megoldását követve változó fordulatszám és változó terhelés mellett képes egymással pontszerűen érintkező henger és gyűrűfelület között kialakuló súrlódás vizsgálatára.

A később ismertetendő legnagyobb beállítható terhelés alapján számolt Hertz-féle feszültség a 4. ábra csapágygyűrűje és a 22mm átmérőjű hengeres rúd érintkezésében jóval alatta marad a gyakorlati értékeknek a $\sim 320\text{MPa}$ értékével.

A súrlódási tényező mérése kenés nélküli és különböző kenőanyagokkal, elsősorban kenőzsírral kent acélfelületek között lehetséges. A kenőanyagok a felületekre juttatása és eltávolítása egyszerűen, gyorsan elvégezhető. A kenőanyag fajtájának szabad megválasztását a terhelés és hőmérséklet korlátozza, a merülő olajkenés pedig zárt hajtóműházat igényel.

A tárcsák gyűrűfelülete keményre edzett krómaccél anyagú (csapágygyűrűből készült), a hengerfelület anyag- és felületminősége a hidegen húzott normalizált ötvözetlen szerszámacéltól az edzett kőszőrült ötvözött acélig terjedhet. A terhelés növelése a henger végein szimmetrikusan elhelyezett tömegekkel lehetséges. A tömegek nagyságát a tengelyek megengedett lehajlásának szokásos mértéke korlátozza. Legyen ez az érték a 22 mm átmérőjű, 900 mm hosszú hengeres acélrúd esetén $y_{meg} = 0.3\text{mm}$, melyhez a támaszköz ismeretében a konzolok terhelése a végeken legfeljebb egy-egy 3kg-os tömeggel történhet, a majdnem 3kg-os saját tömegen felül.

A terhelés csökkentése 1mm falvastagságú hidegen vont precíziós acélső választásával lehetséges, ez esetben a saját tömeg 0,5kg alatt lesz, ezért lágyabb kenőzsírok, kisebb viszkozitású kenőolajok vizsgálata is lehetővé válik.

A vizsgálat környezeti hőmérséklete a megengedett határon belül a mérés pontosságát nem rontja, így alacsonyabb hőmérsékleti tartományokban is lehetőség van a kenőanyag által okozott kenőképesség romlás kimutatására.

A 7. ábrával bevezetett elv szerint gördülőcsapágyak gördülési ellenállása vizsgálható. A mérés gyakorlati kivitelezése még további megfontolásokat igényel, mivel meg kell oldani a vizsgált kenőanyaggal ellátott csapágy könnyű és gyors behelyezését a mérő berendezésbe.

8. A MÉRŐESZKÖZ TOVÁBBI FELADATAI

A tárcsák forgatását változtatható fordulatszámú villamos motorral végezzük. Nagymértékű csúszási sebesség változtatás igénye esetén a villamos motor és hajtómű egységének cseréje is megoldható.

A tárcsák megtett körülfordulásainak számát mechanikus fordulatszámoló vagy induktív jeladó és összegző segítségével végezhetjük.

A rúd által megtett teljes rezgések számát ugyancsak induktív jeladó, vevő és összegző által mérhetjük. A mágneses jeladót a rúd közepére erősítjük, a vevő fejet pedig az állványhoz rögzítjük. A vizsgálat t idejének mérését is az összegző végzi. A vevővel összekötött összegző az egyensúlyi helyzetben való N áthaladásokat számlálja. A T periódusidő az előbbieket hányadosának kétszerese, azaz $T = 2t/N$.

9. ÖSSZEGZÉS

Egy jól ismert csúszó súrlódás mérési elv tanulmányozása útján a szerzőnek sikerült olyan eszköz működésének elvi alapjait tisztázni, mely képes egy tetszőleges típusú kenőzsírral feltöltött, adott méretű golyócsapágy gördülési ellenállásának vizsgálatára beállítható üzemi hőmérséklet mellett, és ezzel az adott kenőzsír egy bizonyos képességének kimutatására.

10. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

"A cikkben/előadásban/tanulmányban ismertetett kutató munka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg"

"The described article/presentation/study was carried out as part of the EFOP-3.6.1-16-2016-00011 "Younger and Renewing University – Innovative Knowledge City – institutional development of the University of Miskolc aiming at intelligent specialisation" project implemented in the framework of the Széchenyi 2020 program. The realization of this project is supported by the European Union, co-financed by the European Social Fund."

11. IRODALOM

- [1] Bowden, F.P. and Tabor, D. "The Friction and Lubrication of Solids. Part I", publ. Oxford, Oxford University Press, 1950.
- [2] Balogh, T.: Érintkező felületek száraz súrlódásakor lejátszódó folyamatok numerikus és kísérleti vizsgálata, PhD értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2007.
- [3] Oulsnam, S.R., & B.G. Brothers, Engineering Laboratory Work, Part 1, Applied Mechanics S.3, Cleaver-Hume Press Limited, London, 1960. p38-44.
- [4] Valasek I., Auer J., Kenőanyagok és vizsgálataik, Tribotechnik Kft., Budapest, 2003. p54-55.