

## KUTATÁSI TÉMA SZAKMAI ZÁRÓJELENTÉSE

Témavezető neve: Dr. Eleőd András

Téma címe: Tribológia jelenségek néhány szubmikroszkópikus vonatkozásának vizsgálata

A kutatás időtartama: 2004. 04. 30. – 2007. 12. 31.

### A kutatási témában elvégzett munka és az elért eredmények rövid összefoglalása:

A kutatómunka célja a súrlódó felület igen vékony rétegében, az ún. felületközeli rétegben a súrlódási igénybevétel hatására bekövetkező állandósult, ill. tranziens (más kifejezéssel élve stabil és metastabil) szerkezeti változások vizsgálata volt. Ezeket a változásokat a tribológiai szakirodalom TTS-nek (Tribological Transformation of the Surface) nevezi.

Vizsgálatainkhoz az előző kutatások tapasztalataiból kiindulva, fémes és nemfémes súrlódó felületpárokat használtunk, egyrészt alkalmazástechnikai, másrészt alapkutatói szempontok szerint végzett kiválasztás alapján. A súrlódó felületek geometriája a vizsgálatok döntő többségénél gömb-síkfelület jellegű volt, mivel ennél az érintkezési típusnál legjelentősebb az érintkezési feszültségi állapot hidrosztatikus komponensének hatása. A súrlódásvizsgálatokat szükség szerint kiegészítettük járulékos hidrosztatikus nyomás alatt végzett anyagvizsgálatokkal, amelynek eredményeiből a súrlódásvizsgálat numerikus szimulációjához szükséges anyagtvényt határoztuk meg. A súrlódásvizsgálatok körét kiegészítettük azokkal a roncsolásmentes vizsgálatokkal (tapintós és érintkezésmentes topográfia, optikai- és elektronmikroszkópia, elektron-diffrakció, Raman-spektroszkópia, Röntgen-diffrakció, atomerő-mikroszkópia, mikro- és nanokeménységmérés), amelyek segítségével a súrlódott felület (gyakorlatilag a kopásnyom) minőségi és mennyiségi jellemzését el lehetett végezni. Úgy a próbatestek elkészítéséhez, mint a vizsgálatok elvégzéséhez, ill. az eredmények kiértékeléséhez és közzétételéhez minden esetben felhasználtuk széleskörű nemzetközi kapcsolatainkat is (részletesen lásd később), amelyek nagymértékben hozzájárultak, hogy a megkezdett kutatómunkát az OTKA támogatás befejezése után is folytatni tudjuk.

A kutatási munkatervhez kapcsolódó kísérleteinket a korábbi nemzetközi együttműködés keretében végzett vizsgálatainkhoz használt anyagokkal, ill. próbatestekkel (szálerősítésű karbon-karbon kompozittal, amorf karbon bevonattal, valamint polikristályos gyémánt bevonattal) kezdtük el.

A szálerősítésű karbon-karbon kompozit anyagok (féktárcsa-fékbetét) kopásvizsgálatát az INSA de Lyon, Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures-ben végezték el egy doktori kutatómunka [H1] keretében. A koptatott próbatestek felületének Raman-analízise és mikrokeménység vizsgálata (amelyeket Magyarországon végeztünk) során két érdekes, újszerű felismerésre jutottunk. Egyértelműen ki tudtuk mutatni, hogy a szálerősítésű karbon-karbon kompozit súrlódó felületén is kialakul az ún. TTS. Mérésekkel igazoltuk egyrészt, hogy a karbonszálak közötti töltőanyag (pirokarbon) a súrlódási igénybevétel hatására maradós alakváltozást is szenvedett. Másrészt kimutattuk, hogy a súrlódó felületre merőlegesen kifutó

karbonszálak keresztmetszetükben amorfizálódtak, megszűnt a kristályos jellegük, és ez az amorfizálódás a felületközeli rétegben glassy-karbon kialakulását eredményezte. Véleményünk szerint ezeknek az amorfizálódott "szigeteknek", valamint a töltőanyag alakváltozóképeségének köszönhető a szálerősítésű karbon-karbon kompozit anyagok kiváló kopásállósága. Tekintettel arra, hogy a fenti kutatómunka titkosítva volt, a doktori értekezés eredményein túlmutató új eredményeink publikálásához a francia partner nem járult hozzá. A titkosítást mára már feloldották, így a koptatott felület analízisével kapcsolatos saját vizsgálataink eredményeit a témavezető a készülő MTA doktori értekezéséhez kívánja felhasználni. A fenti kutatómunka folytatásaképpen, az új generációs szálerősítésű karbon-karbon kompozittal végzett kopásvizsgálatok próbatesteinek mikrokeménység vizsgálata során arra a felismerésre jutottunk, hogy a pirokarbon képlékeny alakváltozóképeségén kívül a felületközeli rétegben a súrlódó felülettel párhuzamosan elhelyezkedő karbon szálak jelentős rugalmas hiszterézissel is rendelkeznek. Ez a rugalmas hiszterézis azt jelenti, hogy a súrlódási igénybevétel egy része a szálak rugalmas alakváltozása során a belső súrlódás leküzdésére fordítódik, ezáltal az érintkező felületek közötti súrlódási tényező megnő. A súrlódási igénybevétel megszűnése után a rugalmasan igénybevett felületrészek regenerálódnak, ezáltal csökken a felületről letöredezett részecskék mennyisége, azaz csökken a kopás. A felületközeli réteg rugalmas hiszterézise tehát a súrlódási tényező növekedése mellett a kopás csökkenését eredményezi. Az új generációs karbon-karbon kompozit anyagok kutatási eredményei, csakúgy, mint az elkészült második disszertáció [H2], jelenleg még titoktartási kötelezettség alatt állnak, aminek feloldása után a saját eredményeinket úgyszintén az készülő MTA doktori értekezésemhez szeretném felhasználni.

Amorf karbon (DLC=Diamond Like Carbon) bevonatok tribológiai viselkedésével kapcsolatos kutatásaink az előző támogatási ciklusra nyúlnak vissza [H3]. A jelen kutatási ciklusban ezeket az anyagokat csak a TTS kialakulásának szempontjából vizsgáltuk. A vizsgált DLC bevonatokat magyar cég készítette, a vizsgálatok egy részét a Szilárdtest Fizikai Kutató Intézetben és a Központi Kémiai Kutató Intézetben végezték. Méréseinkkel, csakúgy mint a korábbi vizsgálatok során, minden esetben igazoltuk, hogy még ezek a ridegnek tartott, kemény és kopásálló bevonatok is képesek maradó alakváltozásra a tribológiai igénybevétel hatására. Egy merőben új, de lehetséges magyarázatát (a klaszterek „bogáncsszerű” elmozdulását a legszorosabb illeszkedési állapot eléréséig) javasoltunk az alakváltozás mechanizmusának leírására, és bemutattuk, hogy az alakváltozás hatására a DLC bevonat klasztrekből álló szerkezetében olyan állandósult változás jön létre, amely a polikristályos fémek felkeményedési mechanizmusához hasonló tulajdonságváltozásokat eredményez [1]. Mérésekkel igazoltuk, hogy a DLC bevonat kompaktálódása során a maradófeszültségek megjelenésével együtt növekszik az amorf szerkezet rendezettsége. EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) vizsgálattal kimutattuk, hogy az amorf karbon bevonat, az alapréteg és szubsztrátum között a tribológiai igénybevétel hatására mechanikai ötvöződés is létrejöhet.

A nemfémes felületek harmadik vizsgált csoportját a polikristályos gyémánt bevonattal ellátott keményfém felületek alkották. Ezeknek a vizsgálatoknak is szépszámú publikációval alátámasztott előzménye volt a korábbi kutatási ciklusban [H4]. A bevonatok és az elektronmikroszkópi vizsgálatok ebben az esetben is nemzetközi együttműködésben, részben a Metz-i Egyetem Equipe de Recherche en Mécanique et Energétique des Surfaces (ERMES) Laboratoire de Physique et de Mécanique des Matériaux (LPMM) laboratóriumában, Nancy-ban, részben pedig a Mulhouse-i Institut de Chimie des Surfaces et Interfaces (ICHSI)-ben készültek. A jelen pályázati támogatással végzett kutatások egyrészt a bevonatok tribológiai igénybevételnek elemzésével foglalkoztak, másrészt a bevonatban kialakult szerkezeti

változások kimutatására és lehetőség szerinti azonosítására szolgáltak. A tribológiai igénybevétel mechanikai összetevőit, ill. a bevonat tönkremenetelét okozó határigénybevételt a súrlódásvizsgálatokkal és a párhuzamosan végzett numerikus (végelelemes) szimuláció segítségével sikerült meghatározni [2,4,5]. A polikristályos gyémánt bevonatokkal végzett súrlódásvizsgálatok próbatesteit pásztázó elektronmikroszkóppal és Raman-spektroszkópiával vizsgáltuk. A Raman-spektrumok összehasonlító analízisének eredményeit összevetve a végelelemes analízis eredményeivel, egybehangzóan megállapíthattuk, hogy a polikristályos gyémánt bevonat tönkremeneteléért elsősorban a bevonat törése (delaminációja) és csak kismértékben az amorfizálódása vagy grafitizálódása felelős. Megállapítottuk továbbá, hogy a súrlódás során fellépő hőmérséklet növekedés a bevonat szempontjából jótékony hatással rendelkezik, mivel a bevonat és a szubsztrátum eltérő mértékű hőtágulása következtében kiegyenlítődik a bevonat növesztésekor a bevonatban kialakult maradófeszültség. A kutatások eredményeiről a [5] publikáció ad megfelelő részletességű áttekintést.

A polikristályos gyémánt és amorf karbon bevonatokkal végzett kutatásaink eredményeképpen kidolgoztunk egy méretezési, ill. ellenőrzési eljárást, amelynek segítségével, a várható súrlódási igénybevétel ismeretében, a bevonatokkal szemben támasztott legfontosabb követelmények meghatározhatók [6].

Fémes felületek esetén a felületközeli rétegben bekövetkezett változásokat nagy tisztaságú magnéziummal és titánnal végzett kísérletekkel vizsgáltuk [7,8,9,10]. Mindkét fém hexagonális kristályrácsú, de a nagyobb rácsállandó viszonya miatt a magnézium atmoszférikus nyomáson és szobahőmérsékleten csak igen korlátozott mértékű alakváltozóképeséggel rendelkezik, míg a titán kristályszerkezetének rácsparaméterei lehetővé teszik, hogy a képlékeny csúszás szobahőmérsékleten és atmoszférikus nyomáson is akadálytalanul megindulhasson. A járulékos hidrosztatikus nyomás alatt végzett zömítő vizsgálatok azt mutatták, hogy a magnézium alakváltozása alapvetően csúszási sávokra korlátozódik (lokálisan alakváltozik), míg a titánnál nem lehetett alakváltozási zónákat megkülönböztetni, gyakorlatilag az egész térfogat azonos mértékben alakváltozott. A folyásgörbékben látható, hogy a magnézium atmoszférikus nyomáson néhány százaléknál alakváltozás után eltörött, míg járulékos hidrosztatikus nyomás mellett, a csúszási sávokban kialakuló dinamikus rekrisztallizáció hatására jelentősen megnőtt az alakíthatósága. A járulékos hidrosztatikus nyomás hatására a kezdeti keményedés után az alakváltozás mindkét fém esetén keményedésmentesen ment végbe. Az alakíthatósági határfelületek azt mutatják, hogy a magnézium alakváltozóképesége gyakorlatilag nem függ a feszültségi állapot jellegétől, a járulékos hidrosztatikus nyomás hatására viszont az alakíthatósága jelentős mértékben megnőtt. Ezzel szemben a titán alakváltozóképesége alapvetően az aktuális feszültségi állapottól függ és gyakorlatilag érzéketlen a járulékos hidrosztatikus nyomás mértékére.

A hidrosztatikus nyomás alatt végzett vizsgálatoknál tapasztalt tulajdonságbeli különbség a súrlódás, ill. kopás mechanizmusában is különbözőséget jelentett. A magnéziumnál intenzív részecskeleválás jellemezte a súrlódási folyamatot, míg a titánnál a súrlódó felület teljes egészében nagymértékű képlékeny alakváltozást szenvedett. A súrlódás mechanizmusával, ill. a kopásnyom kialakulásával kapcsolatos észrevételeinket a nanokeményésgmérés és az AFM vizsgálatok eredményei is alátámasztották.

A kopásnyomok Röntgen-diffrakciós vizsgálata során megállapítottuk, hogy a magnéziumnál a bázissík csúcsánál jelentős félértékszélesség és intenzitás csökkenés következett be, míg az erre merőleges, ill. a bázissíkkal szöget bezáró síkokra jellemző csúcsoknál a különbség

lényegesen kisebb. Ebből arra következtettünk, hogy a súrlódás során a felületközeli réteg domain szerkezetének orientáltsága csökkent, a szerkezet felaprózódott vagy újrakristályosodott. A jellemző reflexiókhoz tartozó csúcsok a kopásnyomban az alapanyagéhoz képest kismértékben jobbra tolódtak, azaz az atomsíkok közötti távolság csökkent, ami maradófeszültségek jelenlétére utal.

Titán esetében az intenzitásokat tekintve inkább visszarendeződés, homogenizálódás volt megfigyelhető, nem pedig orientálódás. A csúcsok eltolódásának a titánnál is az atomsík távolság csökkenésének irányába történt, de mértékük különböző, a fő csúszási síkokban gyakorlatilag elhanyagolható. A jellemző domain méret sem változott a kiindulási értékhez képest. Mindebből arra következtethetünk, hogy a súrlódás hatására a felületközeli réteg szerkezete dinamikusan megújult.

A kopásnyomok nagyfelbontású Röntgen-diffrakciós vizsgálata során megállapítottuk, hogy a magnézium felületének alakváltozása az ikresedésen túlmenően alapvetően a csavardiszlokációk jelenlétének volt köszönhető. A csavardiszlokációk keresztcsúsítása két nagyságrenddel nagyobb energiát igényel, mint a saját csúszási síkjukban való elmozdulás. Magnézium esetében az alakváltozás során felszabaduló termikus energia a jó hővezetőképesség miatt gyorsan eltávozik, így a feszültségi állapot hidrosztatikus nyomáskomponensének lényegesen nagyobb szerepe van az alakváltozóképeség fenntartásában, mint a titán esetében. A hidrosztatikus nyomás egyrészt átmenetileg csökkenti a rácsparaméter hányadost, ezáltal növeli a csúszási rendszerek aktivizálódásának lehetőségét, másrészt csökkenti a diszlokációk felhasadásának (a parciális diszlokációk keletkezésének) esélyét, továbbá összenyomja a szalag diszlokációkat, azaz megkönnyíti a keresztcsúsítást. A diszlokációk keresztcsúsítása a szemcseszerkezet diszlokációs struktúrájának megújulását és ezáltal az alakváltozóképeség növekedését eredményezte. A diszlokációk keresztcsúsításának megindulása tehát a felületközeli réteg mikroszerkezetének megújulását, ill. újrakristályosodását eredményezheti. Ez a folyamat viszont még a vizsgált térfogatban sem homogén módon játszódott le. Feltételezhetjük, hogy az erősen alakváltozott szemcsékben a megújulás, ill. újrakristályosodás könnyebben mehetett végbe végbe.

A titán rétegződési-hiba energiája mintegy tízszerese a magnéziuménak. Ebből következően a diszlokációk keresztcsúsításához kevesebb energiára van szüksége. A titán hővezetőképessége egy nagyságrenddel rosszabb, mint a magnéziumé, így az alakváltozás során a csúszási síkban felszabaduló hő csaknem teljes egészében a diszlokációk keresztcsúsításának termikus aktiválására fordítható. A titán esetében tehát a feszültségi állapot hidrosztatikus nyomáskomponensének az alakváltozóképeségre gyakorolt hatása lényegesen kisebb, mint a magnéziumnál. A termikus aktiválás elősegítette a szemcseszerkezet megújulását az alakváltozott felületközeli réteg teljes vastagságában.

A felületközeli réteg alakváltozóképeségének kimerülésével meginduló részecskeleválást és annak numerikus modellezhetőségét (levelező) doktori kutatómunka keretében vizsgáltuk [11,12,13,14]. Ötvözetlen szénacélon végzett vizsgálataink világosan bizonyították, hogy a TTS képződés, a részecskeleválás és a részecskék egy részének visszaépülése a kopásnyomba nem egyszerű, időben egymást követő elemi részfolyamatok, hanem egymással párhuzamosan lejátszódó jelenségek, amelyek a súrlódás kezdetétől fogva, egymásra is jelentős hatást gyakorolva, együtt határozzák meg a kopás mechanizmusát. Végeselemes számításokon alapuló numerikus szimuláció segítségével kimutattuk, hogy a járulékos hidrosztatikus nyomás mellett meghatározott anyagtörvénnyel, valamint a Darvas-Ziaja-féle, az aktuális feszültségi és alakváltozási állapottól függő törési határalakváltozás alkalmazásával a felületközeli réteg alakváltozása és a részecskeleválás folyamata modellezhető.

### A kutatásban együttműködő külföldi partnereink és az együttműködés formája:

- INSA de Lyon, Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Corps Solides, MTA-CNRS által támogatott együttműködés, 2008. évre már nem kapott hosszabbítást.
- Equipe de Recherche en Mécanique et Energétique des Surfaces (ERMES) du Laboratoire de Physique et de Mécanique des Matériaux (LPMM), Nancy, MTA-CNRS által támogatott együttműködés. Az 1998 óta több cikluson keresztül folyamatosan végzett kutatómunka 2005-ben, a francia partner nyugdíjba vonulása miatt, befejeződött.
- Institut de Chimie des Surfaces et Interfaces (ICHSI), Mulhouse, TÉT-CNRS által támogatott együttműködés. Az együttműködés a második hosszabbítás után 2006-ban befejeződött. A két fél közötti tudományos együttműködés változatlanul folytatódik.
- Liebherr-Aerospace Toulouse SAS, EU6 Framework keretében végzett kutatómunka (BEARINGS 030937), 2006-2009.

### OTKA támogatással megvalósult külföldi látogatások, tanulmányutak:

- Institut Franco-Allemand de Recherches de Saint Louis/Franciaország, 2006. április (Eleőd A., Juhász G.)
- INSA de Lyon, LaMCoS/Franciaország, 2007. június (Juhász G.)
- INSA de Lyon, LaMCoS/Franciaország, 2007. december (Eleőd A.)

### OTKA támogatás nélkül megvalósult külföldi tanulmányutak:

- INSA de Lyon, Lyon/Franciaország, 2004. október-december (Eleőd A.)
- ERMES-LPMM, Nancy és Institut de Chimie des Surfaces et Interfaces (ICHSI), Mulhouse, 2004 november (Eleőd A.)
- INSA de Lyon, Lyon/Franciaország, 2005. december (Eleőd A.)
- ERMES-LPMM, Nancy, 2005 november (Eleőd A.)
- INSA de Lyon, LaMCoS/Franciaország, 2006 szeptember (Eleőd A., Törköly T.)

### Együttműködő külföldi partner fogadása:

- Daniel Paulmier professzor az ERMES-LPMM-től Nancyból, (7 nap) (nincs OTKA-költség vonzata), 2004.
- Dr. Marjorie Schmitt és Sophie Bistac professzor asszony az ICHSI-től, Mulhouse-ból (7 nap), (nincs OTKA-költség vonzata), 2004.
- Daniel Paulmier professzor az ERMES-LPMM-től Nancyból, (7 nap) (nincs OTKA-költség vonzata), 2005.
- Yves Berthier kutatási igazgató az INSA de Lyon-ról, (10 nap) (nincs OTKA-költség vonzata), 2006.
- Ludger Deters egyetemi tanár, intézetigazgató, Otto-von-Guericke Universitát Magdeburg, (5 nap), (szállásköltsége az OTKA támogatás terhére), 2007.
- Yves Berthier kutatási igazgató, INSA de Lyon, LaMCoS, (4 nap), (utiköltség és szállásköltség az OTKA támogatás terhére)

Előadástartással és publikációval összekötött konferencia részvétel az OTKA támogatásával:

- Viennano 05', 2005, Vienna, Austria, 2005. március 9-11.
- 32nd Leeds-Lyon Symposium on Tribology, 2005. szeptember (előadás nélkül)
- 15th International Colloquium Tribology, Automotive and Industrial Lubrication, January 17-19, 2006, in Stuttgart/Ostfildern Germany, Technische Akademie Esslingen
- 33th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, 2007. szeptember 4-7.
- GfT 48. Tribologie-Fachtagung, 24. bis 26. September 2007 in Göttingen.

A zárójelentésben hivatkozott irodalom:

- [H1] Gouider, M.: Tribologie des composites carbone/carbone : Echelle et contributions relatives de la mécanique et de la physico-chimie. Thèse présentée devant l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon pour obtenir le grade de docteur. 6 décembre 2004, No d'ordre 04-ISAL-0090
- [H2] Kasem, H.: Etude des mécanismes d'usure lors de la friction de composites carbone/carbone. Approche tribologique et physico-chimique : Application au freinage aéronautique. Thèse présentée à l'Université d'Orléans pour obtenir le grade de docteur, le 29 février 2008.
- [H3] Eleöd, A.: Mechanische Belastbarkeit der DLC-Beschichtungen. Tribologie + Schmierungstechnik, 50. Jahrgang, 2/2003, p: 27-33.
- [H4] Eleöd, A.- Schmitt, M.- Paulmier, D.- Devecz, J.: Gyémánt és hidrogénezett amorf karbon tribológiai bevonatok. Gép, LIII. Évfolyam, 2002. 8-9. sz. p:55-58.

Saját publikációk az OTKA nyilvántartási szám feltüntetésével:

1. Eleöd, A. – Veres, M. – Pócsik, I. – Nagy, P.:  
The Deformation Mechanism during Sliding of Thin Amorphous Carbon Coatings.  
14th International Colloquium Tribology, January 13-15, 2004. Tribology and Lubrication Engineering. Technische Akademie Esslingen, Hrsg.: Wilfried J. Bartz, ISBN 3-924813-54-X, pp. 615-623.
2. Schmitt, M. – Eleöd, A.:  
Experimental and Modelling Approaches of the Tribological Behaviour of the Diamond/Steel Couple.  
14th International Colloquium Tribology, January 13-15, 2004. Tribology and Lubrication Engineering. Technische Akademie Esslingen, Hrsg.: Wilfried J. Bartz, ISBN 3-924813-54-X, pp. 623-631.
3. Schmitt, M. - Eleöd, A. - Mougín, K. – Bistac, S.:  
Experimental and numerical approaches of the tribological behaviour of diamond/HSS couple, 7th European Adhesion Conference, EURADH 2004 (September 5-9, 2004) – Freiburg im Breisgau, Germany, Proceedings Vol2, pp. 699-704.
4. Eleöd, A. – Schmitt, M.:  
Experimental and Numerical Analysis of the Degradation of Polycrystalline Diamond

Coatings, 15th International Colloquium Tribology, Automotive and Industrial Lubrication, 2006 January 17-19 in Stuttgart/Ostfildern Germany, Technische Akademie Esslingen, Proceedings on CD-ROM, 15-F8

5. Schmitt, M. – Eleőd, A.:  
Tribological behaviour of diamond coatings sliding against steel: An experimental and numerical approach. *Surface & Coatings Technology*, Vol 201/3-4 pp. 1215-1223.
6. Eleőd, A. - Paulmier, D.:  
Polikristályos gyémánt és amorf karbon bevonatok kiválasztásának és ellenőrzésének szempontjai. *Gép, LVI. évfolyam*, 2005., 9-10. szám, pp. 35-38.
7. Eleőd, A. – Berthier, Y. – Baillet, L. - Törköly, T.:  
Transient and stationary changes of the mechanical properties of the first body governed by the hydrostatic pressure component of the local stress state during dry friction. *Tribology Series*, 42, Editor: D. Dowson, *Transient Processes in Tribology*, Elsevier, 2004, pp. 533-561.
8. Eleőd, A.:  
Deformation induced transient and stationary changes of the near-surface layer, *Viennano 05'*, 2005, Vienna, Austria (Editors W.J. Bartz and F. Franek), ÖTG, ISBN 3-901657-17-7, pp. 149-157.
9. Juhász, G.:  
Etude de la déformabilité des surfaces frottantes.  
Diplomaterv, BME Közlekedésmérnöki Kar, Járműelemek és Hajtások Tanszék, 2007.
10. Eleőd, A. - Berthier, Y. - Lach, E. - Törköly, T. - Juhász, G.:  
Friction induced structural modifications of the near-surface layer. (Synopsis)  
34th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, September 4-7, 2007, INSA de Lyon  
(publikálásra benyújtva a Tribology International-hoz, jelenleg bírálóat alatt áll)
11. Balogh, T. – Eleőd, A.:  
A kopás megindulásának vizsgálata és modellezési lehetőségei száraz súrlódás esetén.  
*Gép, LVII. Évfolyam*, 2006. 4. szám, pp 18-22.
12. Balogh, T. – Eleőd, A.:  
Investigation and Simulation of the Initial Wear in dry Friction.  
*Proceedings 8th International Conference on Tribology* (edited by M. Kozma), 3rd and 4th June 2004 Veszprém, pp. 138-143.
13. Balogh, T:  
Érintkező felületek száraz súrlódásakor lejátszódó folyamatok numerikus és kísérleti vizsgálata.  
PhD értekezés, BME Közlekedésmérnöki Kar, 2007.
14. Eleőd, A.:  
*Numerische Tribologie: Strukturveränderungs- und Verschleißsimulation mit Hilfe der Finiten Elementen Methode.*

GfT 48. Tribologie-Fachtagung, 24. bis 26. September 2007 in Göttingen. Gesellschaft für Tribologie e. V. ISBN 978-3-00-022603-8, pp. 7/1-7/10.  
(közlésre felkérve a Tribologie und Schmierungstechnik számára, jelenleg bírálat alatt áll)