

A FELÜLETKÖZELI RÉTEG SZERKEZETI VÁLTOZÁSAI CSÚSZÓ ÉS GÖRDÜLŐ SÚRLÓDÁS ESETÉN

STRUCTURAL CHANGES OF THE NEAR-SURFACE LAYER DURING SLIDING AND ROLLING FRICTION

Juhász Gábor doktorandusz hallgató, Eleőd András egyetemi tanár

ABSTRACT

Effect of the hydrostatic component of the stress state of sliding and rolling contacts has been investigated from the point of view of structural changes of the near-surface layer of magnesium and titanium specimens.

It has been established, that the increased cracking limit of the near-surface layer may be attributed to the high hydrostatic component of the rolling contact stress state. The deformation of the near-surface layer is more important in the case of sliding friction because of the absence or negligible effect of the hydrostatic stress component.

1. BEVEZETÉS

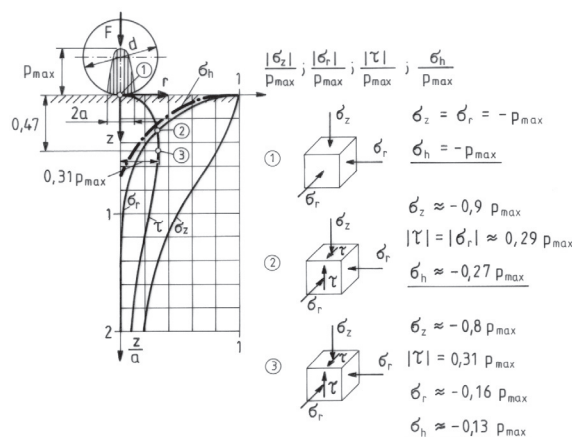
A súrlódó felületek felületközeleli rétegében bekövetkező szerkezeti változásokra először Beilby hívta fel a figyelmet [1]. Csak jó 30 évvel később, a gördülőcsapágyak teherbírásának növelésére irányuló igényekkel együtt került ismét ez a jelenség a kutatók érdeklődési körébe [2]. A súrlódó felületek felületközeleli rétegében bekövetkező szerkezeti változások szerepe és jelentősége a nagy sebességű vasutak síntöréssel szembeni biztonságával kapcsolatban napjainkra ismét felértékelődött [3].

A felületközeleli réteg alakváltozóképesége meghatározó jelentőségű a súrlódási igénybevétel hatására bekövetkező részecskeleválás, valamint a repedésképződés, ill. -terjedés szempontjából. Kármán Tódor óta tudjuk, hogy a kristályos anyagok alakváltozóképeségét az alakítási hőmérséklet mellett a feszültségi állapot hidrosztatikus komponensének növelésével javíthatjuk [4].

Száraz súrlódás esetén a súrlódó felületek lokális és aktuális feszültségi állapota határozza meg a felületközeleli réteg alakváltozóképeségét [5], csakúgy, mint az alakváltozás következtében a felületközeleli rétegben bekövetkező szerkezeti változásokat [6].

2. GÖRDÜLŐ ÉS CSÚSZÓ SÚRLÓDÁS FESZÜLTSEGI ÁLLAPOTA

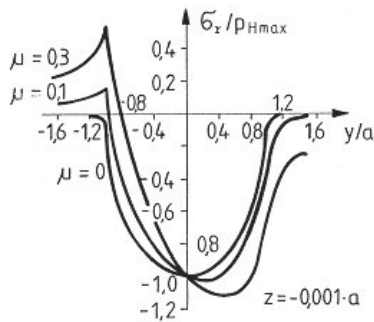
Az ismert jellegzetességeken kívül a jelen kutatás szempontjából legfontosabb különbség a kétféle száraz súrlódási állapot között, hogy a gördülő súrlódásban résztvevő elemek legalább egyike szabályos gömb vagy henger alakú, ami eleve meghatározza az érintkezés feszültségi állapotát (1. ábra).



1. ábra. Golyó-síklap érintkezés Hertz-féle feszültségi állapota

Az ábrán látható, hogy az 1-es érintkezési pontban a feszültségi állapot tisztán hidrosztatikus, a 2-es jelű pontban, ahol a nyírófeszültség éppen a radiális feszültséggel azonos értékű, a σ_h hidrosztatikus feszültség komponens hatása még mindig jelentős, míg a 3-as jelű pontban, ahol a nyírófeszültségnek van maximuma, a hidrosztatikus komponens hatása már elhanyagolható.

Szabályos gömb- vagy henger felületű elemek csúszó, ill. csúszva gördülő súrlódása esetén a szimmetrikus Hertz-feszültség eloszlás torzul, egyrészt a maximális csúsztatófeszültség helye változik meg, másrészt a súrlódás hatására a felület síkjával párhuzamos síkokban ébredő radiális feszültség (σ_r) jellege változik, a lüktető feszültségi állapotból ($\sigma_m = -p_{Hmax}/2$) váltakozó irányú feszültségi állapotba vált ($\sigma_m > -p_{Hmax}/2$) (2. ábra).



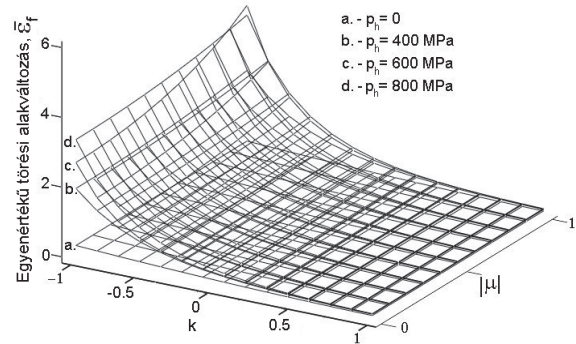
2. ábra. A radiális feszültség komponens változása a súrlódási tényező függvényében, a felületközeli réteg $z=-0,001 \cdot a$ mélységében [7] (a - a Hertz-féle rugalmas belapulás fűlszélessége)

Ez a jelenség a részecskeleválás megindulásának szempontjából lényeges, mivel a húzó komponenssel rendelkező általános, váltakozó irányú feszültségi állapot a halmozódó károsodások szempontjából kedvezőtlenebb, mint a lüktető nyomófeszültségi állapot, tehát adott igénybevétel esetén hamarabb következhet be a törés a felületközeli rétegben, mint súrlódásmentes állapotban [8].

Szabálytalan geometriájú, érdes felületek csúszó súrlódásnál az egyedi mikro-érintkezéseket lehet – kellő képzelőerővel és bátorsággal – csúszó Hertz-féle érintkezésnek tekinteni, és ezáltal a felület lokális feszültségi és alakváltozási állapotát meghatározni [9]. A súrlódó felületek valós felületi topográfiáját tartalmazó végeselemes modellekkel végzett számításoknál a fent említett hiba kiküszöbölhető, ezáltal viszont a makroszkopikus léptékű modell kötelezően mikroszkopikussá zsugorodik.

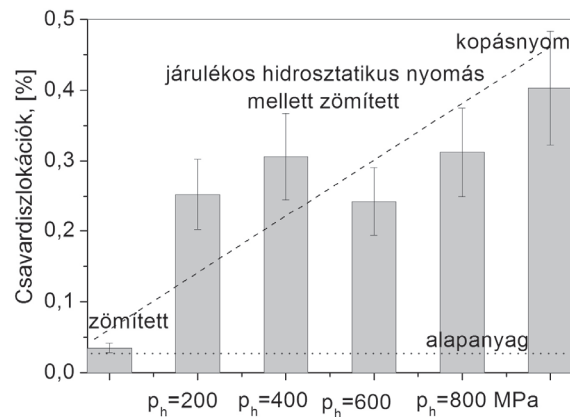
3. A FELÜLETKÖZELI RÉTEG ALAKVÁLTOZÓKÉPESSÉGE

A feszültségi állapot hidrosztatikus nyomáskomponensének hatását a fémek alakváltozó képességére - a felületközeli réteg anyagtörvényének megállapítása céljából - járulékos hidrosztatikus nyomás alatti alakíthatósági próbákkal vizsgálták [6]. A vizsgálatok eredményeként sikerült meghatározni az acél, magnézium és titán anyagok feszültségi állapottól függő törési határalakváltozásának függvényét (3. ábra).



3. ábra. A magnézium Bogatov-féle törési határfelülete (k - Mayer-féle, μ - Lode-féle feszültségmutató)

A járulékos hidrosztatikus nyomás alatt zömített próbatetek nagyfelbontású röntgen-diffrakciós vonalprofil analízisével kimutatható volt a hidrosztatikus nyomás alatti alakváltozás mechanizmusa és a csúszó súrlódás során kialakult felületközeli réteg alakváltozási mechanizmusa közötti hasonlóság (4. ábra).



4. ábra. Magnézium próbatetekben mért csavardiszlokációk eloszlása [10]

A hidrosztatikus nyomáskomponens alakváltozást nem okoz, de a törési határalakváltozás értékét jelentősen megnöveli oly módon, hogy olyan csúszási rendszereket is aktivál, amelyek csak hő bevitel hatására válhatnak aktívvá.

4. VIZSGÁLATOK

Vizsgálatainkhoz nagy tisztaságú, hexagonális rácsszerkezetű magnézium (99,94%) és titán (99,93%, Grade 2) próbateteket használtunk. Az anyagválasztást indokolta, hogy a titán rácállandó-hányadosa lényegesen kisebb, mint az ideális illeszkedésű hexagonális rácse. Ezáltal a titán legsűrűbb illeszkedésű síkjai nem

az alapsíkok, hanem az átlós síkok, így az alakváltozás során az összes prizmatikus és piramidális csúszási rendszere aktívvá válhatott. A magnézium esetében ez az arány közel van a kritikus értékhez, ezért a képlékeny alakváltozás során a csúszás csak az alapsíkbeli csúszási rendszerekben indulhat meg, ill. az alakváltozás csak ikresedéssel mehet végbe mindaddig, amíg a termodinamikai állapottényezők hatására további csúszási rendszerek aktívvá nem válnak.

A csúszó súrlódás vizsgálatok során egy $\frac{1}{2}$ ''-os csapágygolyó kisciklusú, egy irányban ismétlődő (30x15 mm), egyenes vonalú elmozdulást végzett a síkfelületű Mg, ill. Ti próbatesteken. A Hertz-féle felületi nyomás magnézium esetében 200 MPa, titán esetében 1002 MPa volt.

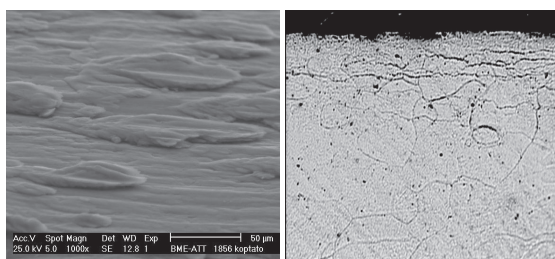
A gördülő vizsgálatokat Shell-4 golyós berendezésen, a forgó ($n=1420 \text{ min}^{-1}$) felső $\frac{1}{2}$ ''-os csapágygolyó által kényszerpályán mozgatott, 3 alsó golyó alá helyezett, kúpos felületű tárcsa próbatesteken végeztük el ($p_H^{Mg}=406 \text{ MPa}$, $p_H^{Ti}=1942 \text{ MPa}$). Az egyenértékű Hertz-feszültségeknek megfelelő terheléseket a súrlódási tényező módosító hatásának [11] figyelembevételével vettük fel.

A csúszó és gördülő súrlódás során kialakult felületközeli réteg tulajdonságait nanobenyomódás vizsgálattal, röntgendiffrakciós vizsgálatokkal, valamint mikroszkópos felvételek segítségével elemeztük.

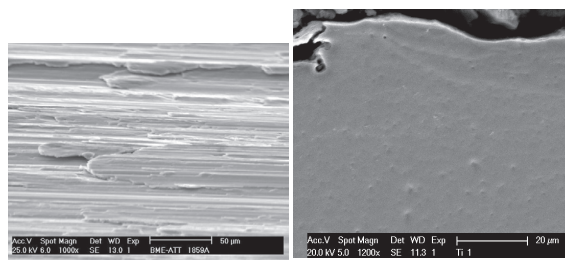
5. VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK

5.1. Kopásnyomok mikroszkópi vizsgálata

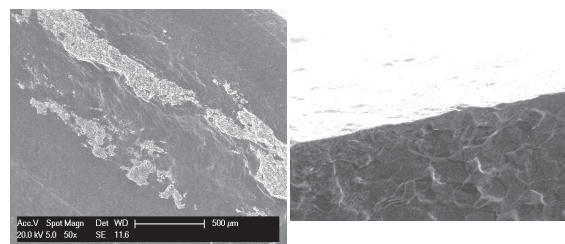
A csúszó és gördülő súrlódásvizsgálatok próbatesteinek kopásnyomáról és annak metszetéről készült pásztázó elektronmikroszkópos felvételeket az 5.-8. ábrák mutatják.



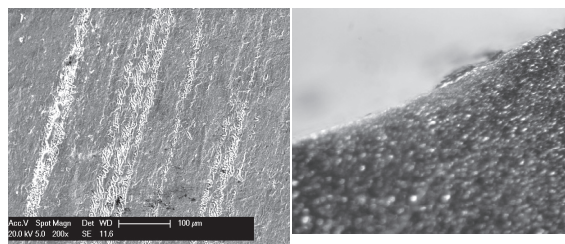
5. ábra. Mg csúszó súrlódás: kopásnyom és metszete



6. ábra. Ti csúszó súrlódás: kopásnyom és metszete



7. ábra. Mg gördülő súrlódás: kopásnyom és metszete

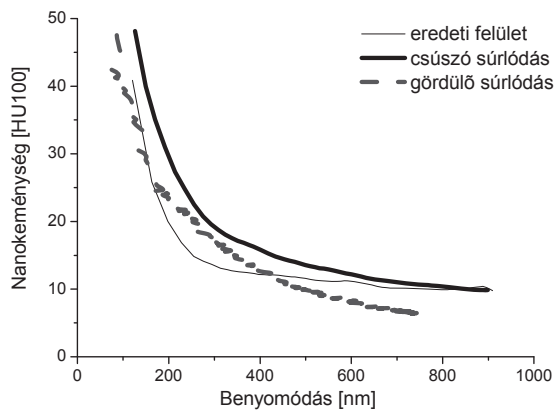


8. ábra. Ti gördülő súrlódás: kopásnyom és metszete

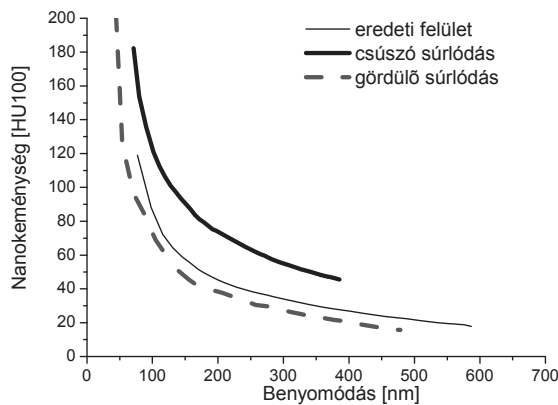
A kopásnyomokról készült felvételek alapján már látszik, hogy csúszó súrlódás esetében jelentősebb volt az alakváltozott felületközeli réteg vastagsága, mint a gördülésnél. Gördülő súrlódás esetében a felületközeli réteg csak nehezen ismerhető fel, vastagsága pontosan nem is mérhető.

5.2. Nanobenyomódás vizsgálatok

Az eredeti felületek és a kopásnyomok benyomódási görbéinek (lásd részletesen bemutatva a [12]-ben) alapján, a felterhelési görbeszakasz pontjaiból számított nanokeményiség eloszlását a felületközeli rétegben a 9.-10. ábrák mutatják.



9. ábra. Mg próbatestek felületközeli rétegének keménysége



10. ábra. Ti próbatestek felületközeli rétegének keménysége

A keménység-eloszlás görbéi alapján a magnézium felületközeli rétegének keménység-változása csak kismértékű, azaz a megváltozott szerkezetű réteg a súrlódás hatására láthatóan lekopott. A titán felületközeli rétege csúszó súrlódás hatására felkeményedett, gördülő hatására viszont nem változott.

5.3. Röntgen-diffrakciós vizsgálatok

A röntgen-diffrakciós vizsgálatok eredményeit teljes részletességgel a [12] tudományos mű tartalmazza, ezeket a jelen cikk keretein belül bemutatni nem lehet. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a titán felületközeli rétegében az alakváltozás hatására a keményedés ellenére sem következett be kimutatható szerkezetváltozás.

Ezzel ellentétben a magnézium felülete másképp viselkedett csúszó és másképp gördülő súrlódás esetén. A csúszó súrlódásnak kitett felületről az alakváltozott részecskék az alakváltozókéességük kimerülése után letoredeztek, kis részük a felületre visszahegedt. Gördülő súrlódás esetén viszont a felületközeli

réteg jelentős mértékben alakvál-tozott és maradófeszültséggel terhelt szemcsékből áll.

6. AZ EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

A vizsgálati eredmények alátámasztani látszanak azt a feltevést, miszerint a súrlódás során kialakuló feszültségi állapot hidrosztatikus komponense jelentősen megnövelheti a korlátozott alakváltozókéességű fémek kopásállóságát a nagy alakváltozásnak kitett felületközeli réteg törési határalakváltozásának megnövelése által.

7. IRODALOM

- [1] Beilby, G.: Aggregation and Flow of Solids, Macmillan (London) (1921), pp 256.
- [2] Styri, H.: Fatigue Strength of Ball Bearing Races, Proc. ASTM, Vol. 51 (1951), pp. 682-700.
- [3] Sato M., Anderson P.M. and Rigney D. A.: Rolling-sliding behavior of rail steels, Wear, 162-164 (1993) 159-172 159
- [4] Kármán, Th.: Festigkeitsversuche unter allseitigen Druck, Zeitschrift VDI, 1911, 55, pp. 1749-1757.
- [5] Kapoor, A. – Johnson, K.L.: Effect of changes in contact geometry on shakedown of surfaces in rolling-sliding contact. Int. J. Mech. Sci. Vol. 34, No. 3, pp. 223 239, 1992
- [6] Eleőd, A., Berthier, Y., Lach, E., Törköly, T., Juhász, G.: Friction-induced structural modifications of Mg and Ti surfaces, Trib. Int., vol. 42, No. 5, May 2009, pp 690-698.
- [7] Wuttke, W.: Tribophysik, VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1986.
- [8] Balogh, T.: Érintkező felületek száraz súrlódásakor lejátszódó folyamatok numerikus és kísérleti vizsgálata, dokt. ért., BME Közlekedésmérnöki Kar, 2007.
- [9] Johnson, K. L.: Contact mechanics and the wear of metals, Wear 190 (1995) pp. 162-170.
- [10] Eleőd, A.: A felületközeli réteg viselkedése száraz súrlódás esetén. MTA dokt. ért., 2009.
- [11] Johnson, K.L.: Contact Mechanics, Cambridge University Press, 1985.
- [12] Juhász, G.: Járműipari titán és magnézium felületi rétegek átmeneti és állandósult változásai száraz súrlódás esetén, dokt. ért. BME-Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, 2013.