



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

DOKTORI TÉZISFÜZETEI

Írta:
Kovács Tünde
okleveles gépészmérnök

ACÉLOK SZÖVETSZERKEZETÉNEK HATÁSA A LOKÁLIS KOPÁSRA

című témakörből,
amellyel a Ph.D. fokozat elnyerésére pályázik

Budapest
2007

Bevezetés

A tribológia a súrlódás, a kopás és a kenés tudománya. A súrlódás és a kopás energia- és tömegvesztéssel járó bonyolult folyamat, aminek következménye a szilárd test felületének folyamatos anyagvesztése. A kiváltó ok a testtel kontaktusban lévő és azon súrlódó szilárd, cseppfolyós vagy légnemű közeg mechanikai, ill. kémiai hatása. A hatásmechanizmusoktól függően abrazív, adhéziós, fáradásos vagy tribokémiai kopási formák léphetnek fel. A különböző jellegű folyamatok egyenként vagy egyidejűleg is előfordulhatnak.

A triborendszert tehát a kopó test (minta), a koptató anyag (ellendarab) és a közöttük elhelyezkedő közeg (köztes anyag) alkotja. Az utóbbi lehet kenőanyag a súrlódás és kopás mérséklése céljából, de lehet abrazív vagy korrózív közeg is, mely ellenkezőleg, a kopás növekedése irányában hat. Külső tényezőként a fajlagos felületi nyomás, a relatív elmozdulás sebessége és úthossza a legfontosabb paraméterek. Az ilyen rendszerek annyira bonyolultak, hogy a tribológiát multidiszciplináris tudománynak szokás tekinteni, melyben több mérnöki szakterület; a mechanika, a fizika, a kémia, a matematika, a metallurgia és anyagtudomány együttesen jelenik meg. Általánosan elfogadott nézet szerint az anyagok kopásállóságát azok keménységével hozzák összefüggésbe, azonban acélok esetében az azonos keménységű, de eltérő hőkezelési állapotú (különböző szövetszerkezetű) darabok eltérő kopásállóságúak lehetnek.

1. A kutatás célkitűzései

A dolgozat célkitűzése a szövetszerkezet kopásállóságra gyakorolt hatásának összehasonlító vizsgálata néhány szerkezeti acél esetében.

A kutatómunka célja szerkezeti acélok - közelebbről az ötvöztelen és a gyengén ötvözött hipoeutektoidos acélok – eltérő szövetszerkezete és a száraz súrlódási folyamatokban mutatott kopásállóság közötti összefüggések feltárása, elemzése volt. A szakirodalmi eredményeket áttekintve döntően három fontos következtetés adódott, ezek a kísérleti módszer és stratégia kidolgozásakor meghatározó fontosságúnak bizonyultak:

A) A szövetszerkezet hatásának minősítésére irányuló kopásvizsgálatoknál kenőanyag alkalmazása nem kívánatos. A kenőanyag jelenléte megnehezíti, sőt az esetek zömében lehetetlenné teszi a szövetszerkezet hatásának objektív értékelését, (ugyanis a kenőanyag és a szövetszerkezet hatását nem lehet különválasztani az eredmények értékelésekor).

B) Csak olyan koptatóberendezés és kísérleti módszer jöhet számításba, amelynek alkalmazása nem eredményezi a vizsgált (koptatott) próbatest eredeti, kiindulási mikroszerkezetének megváltozását, azaz a szövetszerkezet átalakulását. Ebből adódó fontos felismerés, hogy a kopásvizsgálatokhoz kis terhelőerő, és rövid kopási úthossz választása a célszerű, ugyanis ily módon elkerülhető a próbatest súrlódási hő okozta nem kívánatos felmelegedése, és ezáltal a mikroszerkezeti átalakulások (például megeresztődés) végbemenetele.

C) A szakirodalomból ismert, hagyományos koptatóberendezések és vizsgálati módszerek többsége alkalmatlan arra, hogy alkalmazásukkal a szövetszerkezetnek a kopási folyamatra kifejtett hatását eredményesen elemezhessük. Ennek oka döntően az, hogy a vizsgálatok túl hosszú időtartamúak, ill. túlságosan nagy a próbatestek hőterhelése. Ezért szükségesnek véltem egy olyan saját konstrukciójú kísérleti kopásvizsgáló berendezés tervezését és megépítését, amely lehetőséget teremt a fent említett negatív jelenségek kiküszöbölésére és a kopási folyamat objektív körülmények közötti elemzésére.

Vizsgálataim alapvetően a következő feladatok megoldására irányultak:

1. Új konstrukciós elven működő koptatóberendezés tervezése és fejlesztése.
2. Kinetikai modell és szimulációs eljárás kidolgozása a kopásvizsgálatokhoz.
3. Kísérletek végzése három különböző összetételű és szövetszerkezetű szerkezeti acéllal, minőségként 8-8 hőkezeltségi állapotra.
4. A vizsgálatok eredményeiből következtetések levonása a szövetszerkezet, a keménység, ill. a kopásállóság kapcsolatára vonatkozóan.

2. Vizsgálati módszerek

A szakirodalomban széles körben ismertetett kopásvizsgálati elveket számításokkal valamint néhány rekonstruált berendezés kísérleti vizsgálata után megállapítottam, hogy a vizsgált berendezések egyike sem felelt meg a saját célkitűzéseim teljesítéséhez szükséges kísérletek elvégzésére, főként a lokális hőfeljődés okozta szövetszerkezet változás miatt. Ezért egy olyan új konstrukciós elven működő berendezés tervezése és építése mellett döntöttem, mellyel a felsorolt tényezők hatása kiküszöbölhető vagy azok állandó értéken tarthatók.

A szakirodalmi információk áttekintését és értékelését követően, a korábbi tapasztalatok felhasználásával történt a kísérleti anyag (hőkezelt acélminőségek) kiválasztása, a kísérleti berendezés, valamint a modell és a módszer kidolgozása.

Az értekezés első részében a szakirodalom kritikai elemzését végzem el, kitérve a lokális kopás-vizsgálat technikai lehetőségeire, az alkalmazott módszerekre, ezek előnyeinek és hátrányainak értékelésére, majd bemutatom az általam fejlesztett, lokális kopásvizsgálatra alkalmas berendezést, részletezve a fejlesztés egyes lépéseit, valamint az új vizsgálati elven alapuló berendezés alkalmazhatósági vizsgálatait.

Ezt követően a kopási folyamat kvantitatív jellemzésére általánosan használt Archard modellnek egy lehetséges kiterjesztését ismertetem, amely elsődlegesen bolygó-golyós készülékkel detektált kráteres kopási folyamat leírására hivatott.

Ennek sajátossága, hogy a modell alapját képező új típusú differenciálegyenlet az Archard-féle differenciálegyenlettel azonos eredményre vezet, ha a külső modellparaméterek (terhelés, fordulatszám, stb.) konstans értékűek, azaz a folyamat során nem változnak. A javasolt új típusú kopás-kinetikai modell gyakorlati alkalmazását mérési eredményekre támaszkodva, valamint számítógépes szimulációs vizsgálatok eredményeivel demonstráltam. Ezután következik a vizsgálat céljára kiválasztott acélminőségeket (ezek kémiai, fizikai, anyagszerkezeti jellemzőit) és ezek célszerű hőkezelését és a hőkezelés hatására bekövetkező tulajdonságváltozások részletes ismertetése. Végül bemutatom a kopásvizsgálatok eredményeit, és az eredményekből levont következtetéseket.

3. Új tudományos eredmények

1. Tézis

Új elvi megfontolásokra alapozott kopásvizsgálati eljárást dolgoztam ki, amelynek sajátosságai a következők:

1.a. A golyó-sík rendszerű tribométerrel végzett vizsgálat során a golyó sztochasztikus jellegű bolyongást végez, amelyet a súrlódási erő befolyásol oly módon, hogy ennek véletlenszerű többlengelyű változásai véletlenszerű forgásokat is eredményeznek. A súrlódási úthosszban ez nem jelent változást, mert a behajtó tengely szögsebességének a kereszt irányú forgások szögsebességei mindössze 0,001-0,01 –részére tehetők.

Tézishez kapcsolódó publikációk: [1,2,3,4,5,6]

ill. fejezetek az értekezésben: 3.2.1. fejezet

1.b. A bolygó mozgás előnye, hogy automatikusan megújuló, alakhibáktól mentes koptató felületet kapunk, a golyó felületén a kopás egyenletesen oszlik meg, a felületi érdesség a hely függvényében állandónak tekinthető.

Tézishez kapcsolódó publikációk: [1,2,3,4,5,6]

ill. fejezetek az értekezésben: 3.2.1. fejezet

1.c. Az egyenletes kopáseloszlás következménye, hogy golyó megőrzi eredeti gömbalakját. Ezért a geometriailag egyértelműen definiált gömbsüveg térfogatával azonos a kopási térfogat, amelynek számítása visszavezethető az on-line módon, folyamatosan mért kopásmélység meghatározására.

Tézishez kapcsolódó publikációk: [1,2,3,4,5,6]

ill. fejezetek az értekezésben: 3.2.1. fejezet

2. Tézis

Megvizsgáltam a kopási folyamatok kvantitatív jellemzésére elterjedten használatos ún. Archard-modell kiterjesztésének lehetőségét a lokális bolygó-golyós kráteres kopás folyamatának kinetikai leírására. Megmutattam, hogy az Archard-modell célszerű módosításával, ill. újraértelmezésével a bolygó-golyós rendszerű készülékkel mért h kopási mélységnek (amely a kráteres kopás számszerű jellemzője) az idő függvényében történő változása leírható a következő differenciálegyenlettel.

$$\frac{dh}{dt} = \frac{K(h) \cdot N_C(t,h) \cdot f(t,h)}{h}$$

ahol h a kopási mélység, t az idő, K a kopási tényező, N_C a normális irányú erő-komponens, f a fordulatszám. Megállapítható, hogy a kopásmélység növekedési sebessége elvileg független a D golyóátmértől. Ez egyenes következménye annak, hogy a $D=20$ mm golyóátmérő négy nagyságrenddel (azaz 10^4 -szeresével) nagyobb, mint a mérhető maximális ($h_{max}=10 \mu m$) kopásmélység.

Tézishez kapcsolódó publikációk: [9,10]

ill. fejezetek az értekezésben: 3.3.3. fejezet

3. Tézis

Az új típusú kopás-kinetikai differenciálegyenlet sajátossága, hogy paraméterei (terhelés, fordulatszám, kopási tényező) nem szükségképpen konstans értékűek, hanem a t idő és a h kopásmélység alkalmasan választott függvényei is lehetnek.

3.a. Igazoltam, hogy azon speciális esetben, amikor is a modellparaméterek (terhelés, fordulatszám, kopási tényező) értéke konstans, a kopás-kinetikai differenciálegyenlet megoldása zárt alakban előállítható, és a megoldásfüggvényre $h(t) = C_K \cdot t^{1/2}$ alakú összefüggés adódik.

Tézishez kapcsolódó publikációk: [9,10]

ill. fejezetek az értekezésben: 3.3.2. és 3.3.3. fejezetek

3.b. Amennyiben a modell-paraméterek konstansok, akkor $C_K = \sqrt{2KN_C f}$, ahol K a kopási tényező a vizsgált acél kémiai összetételének és a mikroszerkezetének függvénye. A C_K konstans a mérési adatok – azaz az összetartozó idő-kopásmélység (t,h) adatpárok - felhasználásával a legkisebb négyzetek módszerével becsülhető, és C_K ismeretében a kopási tényező számítható.

Tézishez kapcsolódó publikációk: [9,10]

ill. fejezetek az értekezésben: 3.3.2. és 3.3.3. fejezetek

4. Tézis

A kifejlesztett új típusú kopás-vizsgáló eljárás és kopás-kinetikai modell gyakorlati alkalmazhatóságát háromféle hipoeutektoidos, különböző szövetszerkezetű acéllal folytatott kopási vizsgálatok eredményeire támaszkodva demonstráltam. Összhangban a korábbi szakirodalmi adatokkal és tapasztalatokkal, igazoltam, hogy a kopási tényező szoros összefüggést mutat az acél keménységével, de valójában ez a kapcsolat alapvetően a mikroszerkezet által determinált.

4.a. Megállapítottam, hogy leginkább kopásálló az acél akkor, ha szövetszerkezetét egyetlen, nagy keménységű fázis, azaz kizárólag martenzit alkotja (eltekintve a kis mennyiségű maradék ausztenittől). Mindhárom vizsgált acélra egyértelműen a martenzites mikroszerkezet mutatta a legjobb kopásállóságot (a K kopási tényezőt tekintve a kopásállóság kritériumául).

Tézishez kapcsolódó publikációk: [11,12,13,14,15,16,17]

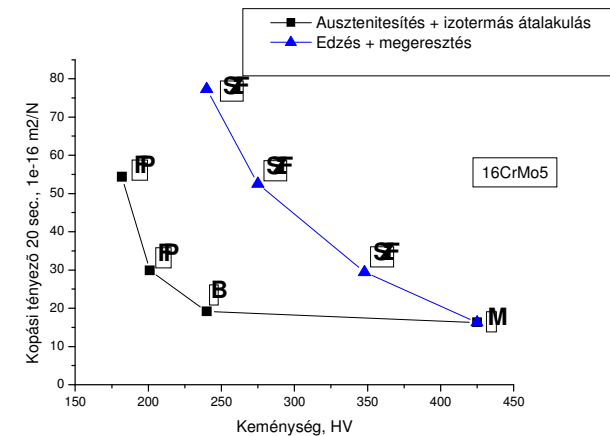
ill. fejezetek az értekezésben: 3.4.6. fejezet

4.b. A martenzites szövet kopásállóságától némileg elmarad a bénites szövet kopásállósága, de a kettő között szignifikáns különbség nem mutatható ki.

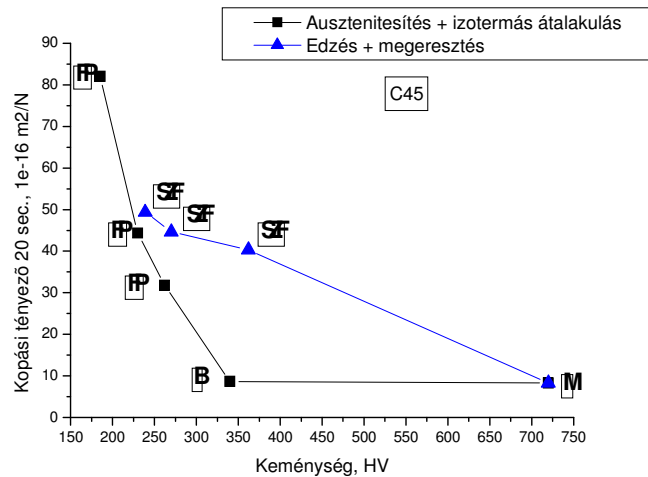
Tézishez kapcsolódó publikációk: [11,12,13,14,15,16,17]

ill. fejezetek az értekezésben: 3.4.6. fejezet

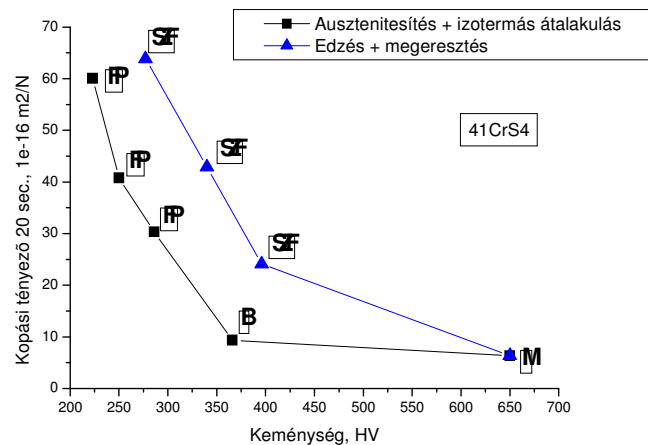
4.c. Megállapítottam, hogy közel azonos keménység mellett a szferoiditos szövet kopási tényezője (K_{SZF}) mintegy 2-3 –szor nagyobb, mint a bénites szövet kopási tényezője (K_B), azaz azonos keménység mellett a bénites szerkezet lényegesen jobb kopásállósággal jellemezhető, mint a szferoidites szövetszerkezet (1-3. ábrák).



1. ábra A keménység kopási tényező kapcsolat a 16CrMo5 anyag különböző hőkezelési állapotaiban



2. ábra A keménység kopási tényező kapcsolat a C45 anyag különböző hőkezelési állapotaiban



3. ábra A keménység kopási tényező kapcsolat a 41CrS4 anyag különböző hőkezelési állapotaiban

Tézishez kapcsolódó publikációk: [11,12,13,14,15,16,17]

ill. fejezetek az értekezésben: 3.4.6. fejezet

4.d. A vizsgálati eredményekből azt a megállapítást vontam le, hogy a kétfázisú szövetelemek (bénites, ferrit-perlites és szferoiditos) közül csökkenő kopásállóság sorrendje szerint: a bénites szövetszerkezet, majd a hőkezelési paraméterektől függően (izotermás átalakulás hőmérséklet, megeresztési hőmérséklet) a ferrit-perlites, végül a szferoidites szerkezet következik.

Tézishez kapcsolódó publikációk: [11,12,13,14,15,16,17]

ill. fejezetek az értekezésben: 3.4.6. fejezet

4. Az eredmények hasznosítása

Az új elven működő berendezéssel elkerülhetők a hőfejlődés miatti szövetszerkezeti változások, így az lehetőséget biztosít arra, hogy azonos kémiai összetételű, de különböző szövetszerkezetű (hőkezelési állapotú) acélok kopásállósági sorrendjét meghatározzuk. Elősegítve ezzel a megfelelő hőkezelési technológia kiválasztását.

A vizsgálat során a koptatógolyó megőrzi eredeti gömbalakját, ezért geometriailag egyértelműen definiált gömbsüveg térfogatával azonos a kopási térfogat, amelynek számítása visszavezethető az on-line módon, folyamatosan mért kopásmélység meghatározására. A kopási folyamat során a kikopott kráter mélysége on-line mérhető, ami

lehetőséget biztosít arra, hogy az egyes darabok kopás-kinetikáját tanulmányozni lehessen.

A kidolgozott matematikai módszer lehetővé teszi a kopási tényező korrekt meghatározását, másrészt lehetőséget ad a mérési eredmények birtokában a kopás kezdeti szakaszában lezajló folyamatok leírására, előrejelzésére.

A kopási tényező becslésekor, amint azt a szakirodalmi források is tanúsítják, az alapadatok és az ezek alapján becsült paraméterek jelentős mértékű szórásával kell számolni.

Az általam alkalmazott új módszer esetén a relatív szórás értékei alapvetően 10 és 30 % között változnak, így arra lehet következtetni, hogy a kopási tényezők átlagértékében tapasztalt eltérések megbízhatóan kimutathatók, az eltérő szövetszerkezet hatása a kopási tényező változására jól felismerhető.

A tézisekhez kapcsolódó publikációk jegyzéke

- [1] **Kovács T.:** Kopásvizsgálatok tervezési szempontjai, Kolozsvár Műszaki Tudományos füzetek VIII. o. 99-102. 2003.03.21. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka VIII. Kolozsvár
- [2] **Kovács T., Dévényi L.:** Új típusú lokális kopásvizsgálati eljárás alkalmazhatóságának elemzése, Gép folyóirat Budapest, 2005/2-3. o.60-63

- [3] **Kovács T., Dévényi L.:** Módosított elrendezésű lokális kopásvizsgálati eljárás alkalmazhatóságának elemzése, Budapest, Bánki Jubileumi Konferencia 2004. november 11-12. CD/ISBN:9637154361
- [4] **Kovács T., Dévényi L.:** Új típusú lokális kopásvizsgálati eljárás alkalmazhatóságának elemzése, Gép folyóirat Budapest, 2005/2-3. o.60-63
- [5] **Kovács T., Dévényi L.:** Módosított elrendezésű lokális kopásvizsgálati eljárás alkalmazhatóságának elemzése, Budapest, Bánki Jubileumi Konferencia 2004. november 11-12. CD/ISBN:9637154361
- [6] **Kovács T., Dévényi L. :** The analysis of the application conditions in local wear-testing phenomenon based on the theory of ball-plane impact Proceedings of the fourth conference on mechanical engineering 2004. p. 107-110. Gépészet 2004. Konferencia
- [7] **Kovács T., Dévényi L.:** Golyó/sík érintkezés elvén alapuló lokális kopásvizsgálati eljárás alkalmazási feltételeinek elemzése Kolozsvár Műszaki Tudományos füzetek IX. o. 155-162. 2004.03.26-27. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka IX. Kolozsvár
- [8] **Kovács T., Barányi I., Dévényi L.:** Golyó/sík elrendezésű koptatóberendezés elemzése, Kolozsvár Műszaki Tudományos füzetek XI. o. 205-210. 2006.03.24-25. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka XI. Kolozsvár
- [9] **Kovács T., Horváth L., Réti T.:** Kopási károsodási folyamatok modellezése Kolozsvár Műszaki Tudományos

- füzetek VII. o. 87-91. 2002.03.22. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka VII. Kolozsvár
- [10] Réti T., **Kovács T.**: A Phenomenological Method for the Prediction of Damage Accumulation Processes under Varying External Conditions, Material Science Forum Vols.414-415. (2003) p. 317-322 Trans. Tech. Publications, Switzerland
- [11] **Kovács T.**, Dévényi L. : Investigation of the Wear Process by Using a Gradient Method Material Science Forum Vols. 473-474 (2005) p.213-218 Trans. Tech. Publications Switzerland
- [12] **Kovács T.**, Dévényi L.: A szövetszerkezet hatása a lokális kopásra, Kolozsvár Műszaki Tudományos füzetek X. o. 271-278. 2005.03.18-19. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka X. Kolozsvár
- [14] **Kovács T.**, Dévényi L.: The effect of microstructure on the wear phenomena, Material Science Forum Vols. 537-538 (2007) p. 397-404 Trans. Tech. Publications Switzerland
- [15] Molnár Gy., **Kovács T.**, Nagyné Halász E.: Acél próbatestek kopásvizsgálata, Kolozsvár Műszaki Tudományos füzetek XI. o. 271-274. 2006.03.24-25. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka XI. Kolozsvár
- [16] **Kovács T.**, Réger M., Dévényi L.: The relation between the surface roughness and the local wearing, Gépészet 2006. ISBN 963 593 465 3
- [17] **Kovács T.**, Kuzsella L., Dévényi L.: Comparison of wear coefficient in case of two different tribological methods, microCAD 2005. International Scientific Conference, Miskolc 2005. márc.10-11. p. 81-86. ISBN 963 661 646 9
ö