FIATAL MŰSZAKIAK TUDOMÁNYOS ÜLÉSSZAKA

Kolozsvár, 2002. március 22-23.

KOPÁSI KÁROSODÁSI FOLYAMATOK MODELLEZÉSE

Modeling of Damage Accumulation Occurring during Wear Process

Kovács Tünde, Horváth László, Réti Tamás

Budapest Polytechnic, Budapest
H-1081 Budapest, Népszínház u. 8, Hungary

Abstract

A new phenomenological model has been developed for the prediction of damage accumulation processes involving wear phenomena. It is shown that by formal extension of the traditional Archard's law, various types of differential equations can be generated which are applicable to the prediction of the progress of cumulative wear damage processes occurring under conditions of variable external control parameters (load, pressure, temperature, etc). The applicability of this new approach to derive generalized wear evolution equations is demonstrated by calculated results obtained by computer simulation.

1. Bevezetés

A kopáson alapuló kumulatív károsodási folyamatok előrehaladásának fenomenológiai leírására a szakirodalomban elterjedten alkalmazzák az Archard-féle differenciálegyenletet [1]. Jelen dolgozatban, az Archard-modell egy lehetséges kiterjesztését ismertetjük. Ennek sajátossága, hogy a model alapját képező új típusú differenciál egyenlet az Archard-féle differenciálegyenlettel azonos eredményre vezet, ha a külső modellparaméterek (terhelés, csúszási sebesség, stb) konstans értékűek, azaz a folyamat során nem változnak. A javasolt új típusú kopás-kinetikai model gyakorlati alkalmazását számítógépes szimulációs vizsgálatokra támaszkodva demonstráljuk.

2. A tradicionális Archard-féle kopás-kinetikai model

A kopási folyamat előrehaladásának matematikai leírásához az esetek zömében az Archard-féle differenciál egyenletet szokás alkalmazni, amelynek általános alakja:

$$\frac{dD}{dL} = K(F, V) \quad (1)$$

Az (1) egyenletben D a kopási anyagveszteséget képviselő térfogat (m^3), L az ún. kopási úthossz, (m), F a felületre merőleges erőkomponens nagysága (N), V az ún. csúszási sebesség (m/s), dD/dL pedig a kopásnak az úthossz szerinti deriváltja. A fenti egyenlet jobb oldalán található $K(F, V)$ kifejezés egy célszerűen választott függvény, amely a károsodás sebességnek az F terheléstől és a V csúszási sebességtől való függését jellemzi. Szimulációs vizsgálatainkban a $K(F, V)$ függvényt a szakirodalomra támaszkodva [2]

$$K(F, V) = AF^m \exp\left(C \frac{FV}{H_{eq}}\right) \quad (2)$$

alakúnak választottuk. A (2) egyenletben A , m és C konstans paraméterek, H_{eq} pedig az ún. ekvivalens keménység, amely a kopásvizsgálat tárgyát képező próbatest valamint az ellendarab keménységének függvényeként számítható mennyiség [2].

3. Az Archard model általánosítása

Abból a célból, hogy a kopás kinetikai leírását árnyaltabban, több, a folyamat során is változó külső paraméter figyelembe vételével valósíthassuk meg, az Archard-féle differenciál egyenletet általánosítottuk. Az általánosított differenciál egyenlet az alábbi

$$\frac{dD}{dL} = K^S(F, V)L^{S-1}D^{1-S} \quad (3)$$

formulával reprezentálható. E differenciálegyenlet újszerű tulajdonsága, hogy egy $S=S(F, V)$ nem-negatív ún. súlyfüggvényt is tartalmaz, amely lényegében tetszőlegesen választható a kopási mechanizmus sajátosságainak tekintetbe vételével. Az $S=S(F, V)$ súlyfüggvény speciális esetben konstans függvény is lehet, szimulációs vizsgálatainkban ezzel az egyszerűsítő feltételezéssel éltünk. A (3) kopási differenciálegyenlet alapvető jellegzetessége, hogy amennyiben S pozitív konstans, és a kopási kinetikát befolyásoló külső állapot tényezők (nevezetesen az F terhelés és a V csúszási sebesség) értéke ugyancsak konstans, akkor megoldása

$$D(L) = \left\{ \int_0^L SK^S(F, V)L_u^{S-1}dL_u \right\}^{1/S} = K(F, V)L \quad (4)$$

azaz pontosan megegyezik az (1) formula szerinti Archard-féle differenciál egyenletet megoldásával. E felismerésből az a következtetés adódik, hogy az $S = S(F,V)$ súlyfüggvény hatása a kopási kinetikára nézve kizárólag csak akkor érvényesül, ha az állapot paraméterek (azaz F és V) az L kopási úthossz függvényében változó mennyiségek.

4. Szimulációs vizsgálatok eredményei

A javasolt új kopási predikciós modell gyakorlati alkalmazhatóságát szimulációs vizsgálatokra támaszkodva kíséreltük meg tesztelni illetve igazolni. E célra Borland és Bian által publikált mérési adatokat [2] használtuk fel, amelyeket edzett és megeresztett acél ún. száraz koptatása folyamán határoztak meg. A mérésre az ismert „csap-gyűrű” konstrukciós elven alapuló kopásvizsgálat során került sor, mégpedig állandó terhelés (F) és állandó csúszási sebesség (F) kombinációk alkalmazásával, szisztematikusan változtatva a csap (koptató próbatest) valamint a gyűrű (ellendarab) keménységét.

Első lépésként az (1) és (2) egyenletekre valamint a közölt mérési adatokra támaszkodva, többváltozós lineáris regresszió-analízis alkalmazásával meghatároztuk az ismeretlen modell paramétereket, nevezetesen a (2) egyenletben található A , m és C együtthatókat. A számításokhoz az Archard-féle differenciálegyenlet logaritmikus alakját használtuk, amely az

$$\ln\left(\frac{dD}{dL}\right) = \ln(A) + m \cdot \ln(F) + C \frac{FV}{H_{eq}} \tag{5}$$

állítható elő. Az (5) egyenlet paramétereinek becsült értékei rendre: $A = 1.4584 \cdot 10^{17}$, $m = 2.17506$ and $C = 8.8951$, $H_{eq} = 493$. Az ekvivalens keménység számításához a $H_{eq} = H_{ring} + 0.2H_{pin}$ formula szolgált alapul, ahol H_{pin} a próbatest (csap), H_{ring} pedig az ellendarab (gyűrű) Vickers keménysége [2]. Az 1. ábrán az (5) differenciálegyenlet grafikus reprezentációja látható, azaz a kopási sebesség (dD/dL) nagysága a terhelés (F) és a csúszási sebesség (V) függvényében. Itt jegyezzük meg, hogy F és V külső input paraméterek változási tartománya megegyezik a szakirodalomban közölt mérési adatok intervallumával [2].

Második lépésként előállítottuk a (3) formula szerint definiált általánosított Archard-féle differenciálegyenletet, amelynek végső alakja:

$$\frac{dD}{dL} = K^S L^{S-1} D^{1-S} = \left\{ A F^m \exp\left(C \frac{FV}{H_{eq}} \right) \right\}^S L^{S-1} D^{1-S} \tag{6}$$

1. ábra A kopási sebesség változása az erő (F) és csúszási sebesség (V) függvényében

Feltételeztük, hogy az $S=S(F,V)$ súlyfüggvény speciális alakú, nevezetes „állandó értékű” függvény, vagyis S egy alkalmasan választott pozitív konstans modell-paraméter. Ezen egyszerűsítő feltevés számítástechnikai előnye, hogy konstans S esetében a (6) differenciálegyenlet megoldása numerikus integrálásra vezethető vissza, és ennek eredményeként a kumulatív D térfogati kopás értékére

$$D(L) = \left\{ s \int_0^L A^s F^{sm} \exp \left(SC \frac{FV}{H_{eq}} \right) L_u^{s-1} dL_u \right\}^{\frac{1}{s}} \quad (7)$$

adódik. A (7) egyenletből kiindulva számítógépes szimuláció felhasználásával tanulmányoztuk az S modellparaméternek a kopási folyamat előrejelzésére (predikciójára) kifejtett hatását különös tekintettel a külső állapot tényezők (F, V) folyamat közbeni változására.

A (7) egyenletben a F erő és a V csúszási sebesség L kopási úthossz szerinti változásának leírására elvben tetszőleges függvény választható. A szimulációs vizsgálat céljára egyszerű lineáris függvényeket választottunk, ugyanis a gyakorlati kopásvizsgálatok során ezek fordulnak elő leginkább. A választott függvények az alábbiak voltak:

$$F(L) = 50 + L/8 \quad (8)$$

$$V(L) = 0.7 + L/400 \quad (9)$$

ahol az F erő dimenziója N, a V csúszási sebesség dimenziója m/s, az L kopási úthosszé pedig m. Mint megállapítható, mind F mind pedig V a L kopási úthossznak monoton növekvő függvényei. A 2. ábra a szimulációs vizsgálat eredményeit illusztrálja háromféle konstans S modellparaméter esetében, ahol $S = 0.4, 1.0$ és 1.6 . A felső és középső diagram az erő illetve a csúszási sebesség lineáris változását szemlélteti, míg az alsó diagram a kumulatív kopás nagyságát mutatja a mindenkor L kopási úthossz függvényében.

2.ábra A konstans S model-paraméter hatása a kumulatív térfogati kopás nagyságára lineárisan növekvő terhelés (F) és csúszási sebesség (V) esetében

Megállapítható, hogy $S=1$ paraméter választáskor, amint az várható volt, az eredeti Archard-formula szerinti kopási függvényt kapjuk speciális esetként. Amennyiben S értéke 1-től különböző pozitív szám, a predikció az Archard-féle differenciálegyenlet megoldásától eltérő eredményre vezet. Kitűnik, hogy $0 < S < 1$ esetében (például $S=0.4$ választásakor) kisebb mérvű, $S > 1$ esetében (például $S=1.6$ választásakor) pedig nagyobb mértékű kopás adódik az előrejelzés eredményeként. Mindebből arra következtethetünk, hogy az S modell-paraméter alkalmas arra, hogy külső körülmények (nevezetesen F és V változásának) hatását a kopás kinetikájára a korábbi modellekhez képes sokkal erőteljesebben vehessük figyelembe. Hangsúlyozni kell, hogy amennyiben F és V értéke a kopási folyamat során változatlan, az általánosított modell a tradicionális Archard-féle differenciálegyenlettel azonos eredményre vezet.

5. Következtetések

A kumulatív kopási folyamatok kinetikai leírására elterjedten használatos ún. Archard-modell egy lehetséges kiterjesztését ismertettük. Az ismertetett általánosított modell alapját képező differenciálegyenlet az Archard-féle differenciálegyenlettel azonos eredményre vezet, amennyiben a külső input állapotparaméterek (terhelés, csúszási sebesség, stb) konstans értékűek, azaz a folyamat során nem változnak. A javasolt új típusú kopás-kinetikai model gyakorlati alkalmazását számítógépes szimulációs vizsgálatokra támaszkodva demonstráltuk.

Irodalom

- [1] J. F. Archard: Contact and rubbing of flat surfaces, J. Appl. Phys., Vol. 24 (1953) p. 981-988.
- [2] D.W. Borland and S. Bian: Unlubricated Sliding Wear of Steel: Towards an Alternative Wear Equation, Wear, Vol. 209 (1997) p. 171-178.

E-mail: RETI@ZEUS.BANKI.HU