

# A GÉPMEREVSÉG ÉS A SZERSZÁMTARTÓSSÁG KAPCSOLATA FORGÁCSOLÁSNÁL

## THE RELATIONSHIP OF MACHINE RIGIDITY AND TOOL ENDURANCE IN CUTTING

Dr. Pálmai Zoltán\*

### ABSTRACT

*Vibrations play an important role among the reasons for the well-known scatter of tool life in cutting. The model we used for studying flank wear describes wear rate by a non-linear autonomous differential equation that can be handled well by numerical methods. We took into consideration the fluctuation of cutting speed and feed. The results of the numerical simulation clearly show that the wear rate during vibration hardly depends on frequency but intensity a major impact. The unfavourable effect may be mitigated by increasing the rigidity of the machine.*

### 1. BEVEZETÉS

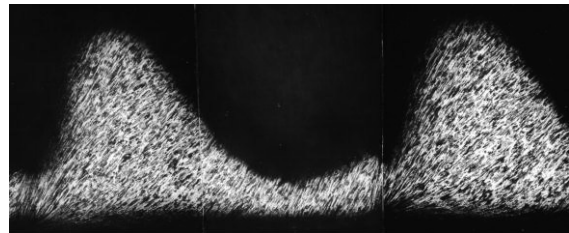
Ismeretes, hogy a forgácsoló szerszámok tartóssága meglehetősen széles határok között szóródik, amely megnehezíti a technológusok dolgát, amikor a drága megmunkáló berendezéseket optimális üzemmódban akarják használni. Ezért hosszú ideje változatlanul a szakmai érdeklődés középpontjában vannak azok az okok, amelyek a szerszámok élettartamának káros szórását előidézik, és azok a lehetőségek, amelyek felhasználásával ez a szórás szűkíthető. A szerszámok idő előtti elhasználódásának olyan nyilvánvaló okai, mint a megmunkálás mechanikai, geometriai körülményeiből eredő rezgések, berezgések, természetesen már régen ismertek (1. ábra).

Lehetnek azonban, és vannak is olyan vibrációt gerjesztő folyamatok, amelyek többnyire rejtve maradnak, ám kedvezőtlen hatásuk azért a szerszámkopásnál mégis megjelenik. Ilyen rezgést gerjesztő hatást fejt ki a forgácsolóerő ingadozása révén az ún. lemezes forgács keletkezése (2. ábra), amelyet máshol már bemutattunk [1].

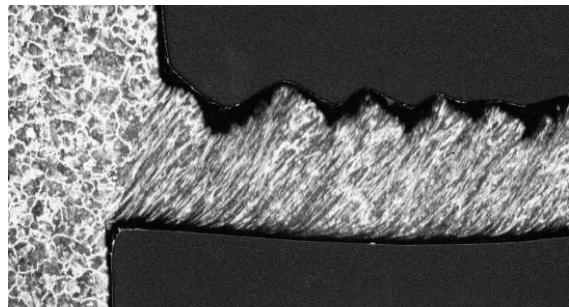
Ahhoz, hogy a vibrációnak a kopásra gyakorolt hatását számszerűsítve is értékelni lehessen, olyan matematikai kopás-modellre van szükség, amely a szerszám elhasználódását a forgácsolás dinamikai viszonyait is figyelembe véve írja le.

\*ny. egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Gépgyártástechnológiai Tanszék, palmayz@t-online.hu

Ehhez dolgoztunk ki egy általános kopási differenciálegyenletet [2], amelynek felhasználásával az itt szükséges elemzések elvégezhetők.



1. ábra. Berezgéskor képződő forgács hosszmetsete

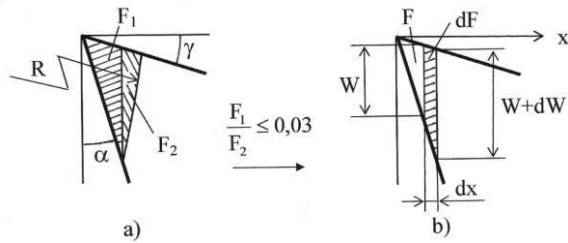


2. ábra. Rezgést gerjesztő lemezes forgács képződése

E tanulmány célja az, hogy a szerszámkopásnak a gyakran rejtett vibrációkra visszavezethető felgyorsulását bemutassa, lehetőséget adva arra, hogy a vibrációt kiváltó okok hatásának csökkentésével az élettartam szórását szűkítsük.

### 2. A SZERSZÁMKOPÁS KOMPLEX EGYENLETE

A szerszámdegradáció számos folyamat következménye lehet, és geometriai jellemzésére is több paraméter, mint a kráterkopás, szélkopás stb. használatos. Tekintettel azonban arra, hogy a korszerű szerszámanyagok elhasználódása a különösen gyakorivá vált finom forgácsleválasztási műveleteknél főleg a hátkopás növekedésében nyilvánul meg, ebben a munkában a szerszám elhasználódását a hátkopással jellemezzük. A geometriai viszonyokat a 3. ábra szemlélteti.



3. ábra. A hátkopás geometriája.

A ténylegesen lekopott anyagterefogat metszetét az a) vázlat mutatja, azonban általában a b) keresztmetszet szerinti egyszerűsített viszonyokat szokás vizsgálni. Ezt tesszük itt is, az ábrán látható megszorítással, ahol a lekopott térfogatot a hátkopás  $W$  méretével jellemezzük. Maga a kopás egyrészt abrázió, adhézió következménye, másrészt termikusan aktivált folyamatok révén következik be. Kiterjedt vizsgálatokkal arra a következtetésre jutottunk [2], hogy a felületi degradáció mindkét, lényegében eltérő jelenségcsoportja függ a végigforgácsolt út hosszúságától is, ezért a hátkopás sebességét a részletek mellőzésével a

$$\frac{dW}{dt} = \frac{v}{W} \left[ A_a + A_{th} \exp\left(-\frac{B}{v^x + KW}\right) \right] \quad (1)$$

nemlineáris, autonóm differenciálegyenlettel írtuk le. Itt  $A_a$  az abrázív,  $A_{th}$  a termikusan aktivált kopásra jellemző konstans,  $v^x$  helyére több technológiai paraméter is bevonható [2], és

$$B = \frac{Q}{RC_v} \quad (2)$$

hol  $Q$  a szerszám hátfelületén a termikusan aktivált kopási komponens aktiválási energiája,  $R=8,29\text{kJ/kmol}$  általános gázállandó,  $C_v$  pedig a hőmérséklet ismert

$$\theta = C_{v,f} v^{0,27} f^{0,16} \quad (3)$$

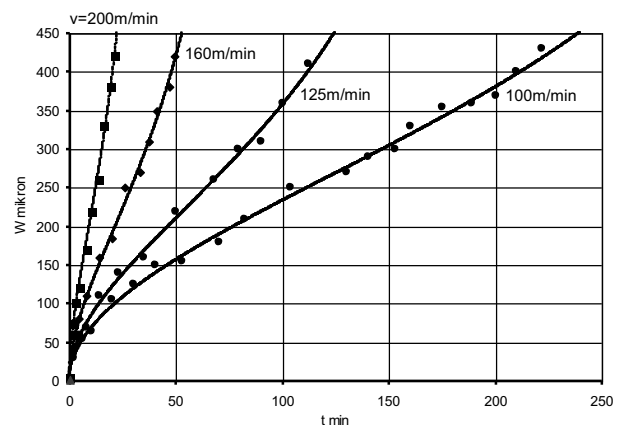
képletének [2] konstansa. A kopásnak a hőmérsékletre gyakorolt hatását a  $\Delta\theta \cong C_W W$  lineáris függvénnyel írjuk le, vagyis  $K=C_W/C_v$  ( $C_v=C_v f^{0,16}$ )

Az (1) kopásegyenlet fontos sajátossága, hogy levezetésénél a technológiai paraméterekre, itt a  $v$  forgácsolósebességre, de mint utalás történt rá, más technológiai paraméterre, mint pl. az  $f$  előtolásra sem tettünk semmilyen megszorítást. Ezek lehetnek a művelet közben konstansok, de szakaszosan vagy folyamatosan változók is. Ilyen módon tehát a kopásegyenlet változó keresztmetszetű forgácsolásra is alkalmazható.

Az egyenlet megoldása numerikus módszerekkel egyszerű, a konstansokat célszerű két csoportban kezelni. Az  $x=0,27$ ,  $y=0,16$  és  $K$  tekintetében, amint az

előbbieken arra már utaltunk, a forgácsoláselmélet sok vizsgálati eredménnyel rendelkezik. Így az új kopási modellnél az (1) egyenlet felírásához voltaképpen három konstans, az  $A_a$ ,  $A_{th}$  és  $B$  meghatározására kell a mérési eredményeket felhasználva célravezető számítási stratégiát kialakítani. Erre különböző, ismert módszerek kínálkoznak.

A részletek mellőzésével egy mérési sorozat eredményét a 4. ábra mutatja [2], amelynél HV 196 keménységű C45 minőségű, hengerelt állapotú acélt esztergáltunk. A (6) egyenlet konstansai  $K=0,002$ ,  $A_a=2$ ,  $A_{th}=2,107$ ,  $B=65$ , amelyekkel aztán a konkrét technológiai igények szerint előírt éltartamkritériumhoz az éltartamok is meghatározhatók. Ezek birtokában aztán, ha szükséges, egyszerű kiszámítani a Taylor-képleteket is.



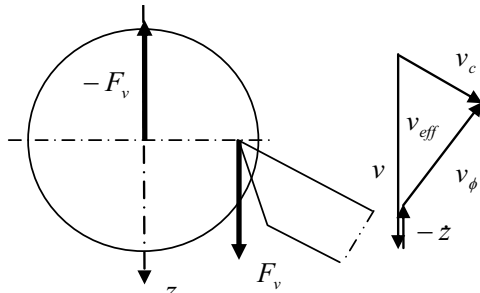
4. ábra. P 20 keménységű szerszám hátkopása különböző forgácsolósebességnél ( $f=0,25\text{ mm/ford.}$ ,  $a=2,5\text{ mm}$ ,  $\alpha=8^\circ$ ,  $\gamma=-6^\circ$ ,  $\lambda=0^\circ$ ,  $\kappa r=60^\circ$ ,  $\varepsilon r=90^\circ$ ,  $r\varepsilon=0,8\text{mm}$ )

Az egyenlet felhasználásánál a kezdeti feltételre sincs megszorítás. Új szerszám esetén az éllekerekedés sugarát lehet választani, használt szerszám esetében pedig az addigi használat során kialakult kopás értéke a kezdeti feltétel. Ez azt is jelenti, hogy az (1) egyenlet különböző forgácsolási műveleteknél egymásután is felhasználható, ha figyelemmel vagyunk arra az egyszerűsítő feltételezésre, amelyet a 3. ábrán az  $F_1$  és  $F_2$  szegmens viszonyára tettünk. Az új, komplex kopásegyenlet fontos tulajdonsága ez, amely lehetővé teszi, hogy külön kísérletek nélkül, akár az üzemi gyártás közben végzett kopásmérések adatait használjuk fel.

### 3. A REZGÉS ÉS A SZERSZÁMKOPÁS KAPCSOLATA

A megmunkáló rendszer rezgésének számos forrása lehet, amelynek kiterjedt szakirodalma van. E dolgozatban, amelynek célja az, hogy a rendszer rezgésének a szerszámkopásra gyakorolt hatását

bemutassa, példaként a forgácsképződési folyamatot használjuk fel. A 2. ábra példája jól szemlélteti, hogy azokban a technológiai esetekben, amikor nem folyóforgács keletkezik, a nyírt vagy lemezes forgács oszcillátorként működik [1, 3]. Az ilyen forgácsképződés egyáltalán nem ritka, pl. az ausztenites acélok [4], Ti-ötvözetek [5] és az edzett acél alkatrészek megmunkálásánál [6] és más ötvözetek, pl. bronz feldolgozásánál is előfordul. A rezgés ilyen gerjesztésének vizsgálatához az 5. ábra az egyik lehetséges legegyszerűbb modellt mutatja, amely a szerszám és a munkadarab között olyan elmozdulást tételez fel, amely a forgácsolósebesség irányába esik.



5. ábra. Sebességviszonyok a munkadarab-szerszám rendszerben

Ez a  $\dot{z}$  sebességű mozgás befolyásolja a tényleges forgácsolási folyamatot, vagyis az effektív sebesség  $v_{eff} = v - \dot{z}$ . Az időben változó  $F(t)$  forgácsolóerő gerjesztő hatását ebben az egyszerű modellben az ismert

$$m_r \ddot{z} + \frac{z}{k} = F(t) \quad (4)$$

mozgásegyenlet írja le, ahol  $m_r$  a szerszám élére redukált tömeg,  $k$  (m/N) a rendszer rúgóállandója.

Az időben változó  $\dot{z}$  meghatározása külön vizsgálatot igényelne [1]. Megállapítható, hogy a lemezes forgácsképződés körülményei között periodikus, ill. kaotikus rezgés is kialakulhat. Ez határozza meg az  $F(t)$  forgácsolóerő időtől függését is, amely tehát kaotikus esetben aperiodikus, periodikus megoldásnál pedig valamely  $\Omega$  frekvenciával oszcillál. Itt most mellőzhetők a részletek, a lényeg jól megmutatható, ha azzal a feltevéssel élünk, hogy a forgácsolósebesség szinuszos függvény szerint változik, azaz

$$v = v_0 + \Delta v \cdot \sin \omega t \quad (5)$$

A rendszer sajátfrekvenciája, mint az ismeretes, a (4) egyenletből  $\omega = 1/\sqrt{m_r k}$ . Tudjuk, abban az esetben, ha  $\omega$  és  $\Omega$  közel kerül egymáshoz, rendkívül káros rezonanciára számíthatunk, még a (4) egyenletből az egyszerűség miatt kihagyott csillapítás jelentős hatása mellett is. Az 1. ábra ilyen körülmények között leválasztott fogácsot mutat. Itt eltekinthetünk ettől, de a

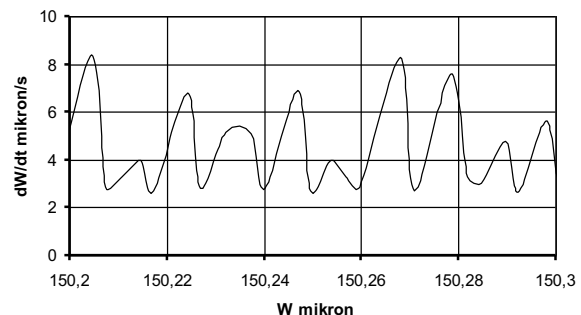
$\Delta v$  sebesség-ingadozást az (1) egyenlet megoldásánál figyelembe kell venni.

Az  $F(t)$  forgácsolóerő azonban az  $f$  előtolás irányában is megterheli a megmunkáló rendszert, azaz  $\Delta f$  értékkel az előtolás is módosul. Itt az ún. regeneratív hatás is érvényesül, vagyis a munkadarab minden fordulata után az előzőnél realizált tényleges előtoláshoz kell viszonyítani az elmozdulást. A bonyolult viszonyok egyszerű modellezéseként az időben változó előtolást itt is szinuszos függvénnyel írjuk le, azaz

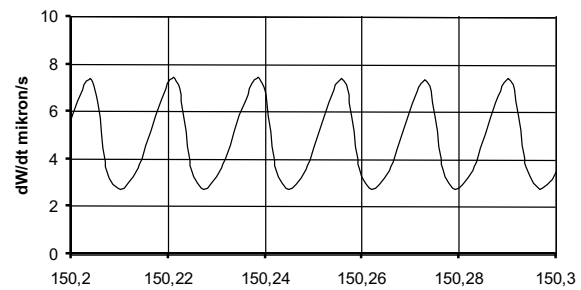
$$f(t) = f + \Delta f [\sin \omega_f t - \sin \omega_f (t - \Delta t)], \quad (6)$$

ahol  $\Delta t$  a munkadarab egy körülfordulásának ideje,  $\omega_f$  az előtolás irányú rezgés körfrekvenciája. Minthogy a megmunkáló rendszer merevsége az  $f$  irányában általában eltér a  $v$  sebesség irányában mérhetőtől,  $\omega_f \neq \omega_v$ .

Az (1) egyenletbe most a (3) képlet felhasználásával az (5) és (6) függvényt kell behelyettesíteni. A lehetséges megoldásokat egy hosszsztergálási példán jól lehet érzékelni. Esztergáljunk  $d=30$  mm átmérőjű hengeres munkadarabot  $v_0=160$  m/min sebességgel és (ebből  $\Delta t=0,0353$  s)  $f=0,25$  mm/ford. előtolással. Tételezzük fel továbbá, hogy  $\Delta v=100$  m/min,  $\Delta f=0,03$  mm. Két tipikus megoldást azonos időintervallumban a 6. ábra mutat. Az a) diagramnál  $\omega_v=10000$  s<sup>-1</sup>,  $\omega_f=7000$  s<sup>-1</sup>, és a  $dW/dt$  kopási sebesség kaotikusan változik, a b) diagram szerint pedig, amelyet  $\omega_v=11000,14$  s<sup>-1</sup>,  $\omega_f=6580$  s<sup>-1</sup> körfrekvenciáknál kaptunk, periodikus.



a)  $\omega_v=10000$ s<sup>-1</sup>,  $\omega_f=7000$ s<sup>-1</sup>

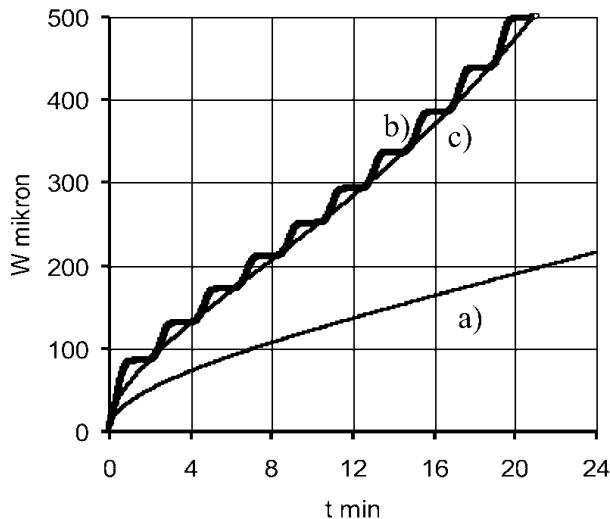


b)  $\omega_v=11000,14$ s<sup>-1</sup>,  $\omega_f=6580$ s<sup>-1</sup>

6. ábra. A (6) egyenlet megoldása a forgácsolósebesség  $\Delta v=100$  m/min és az előtolás  $\Delta f=0,03$  mm szinuszos ingadozása esetén.

Ezek tehát azok a rezgések, amelyek a szerszám kopását befolyásolják, és a rezgésmentes állapothoz képest vibráció esetén meggyorsítják annak elhasználódását. Az előtolás irányú rezgéstől most eltekintve az eredményeket a 7. ábra foglalja össze.

A kopási egyenlet 4. ábra kapcsán közölt konstansaival számolva három kopásgörbe látható. Az  $\omega=0$  a rezgésmentes alapeset.



7. ábra. A szerszám hátkopása különböző  
körfrekvenciájú rezgésnél.  
a) rezgés nélkül, b)  $\omega=0,05 \text{ s}^{-1}$ , c)  $\omega=10^4 \text{ s}^{-1}$

Az  $\omega=0,05 \text{ s}^{-1}$  gyakorlatilag nem fordulhat elő, csak a kopásgörbe „finom szerkezetének” szemléltetésére szerepel az ábrán. Az  $\omega=10^4 \text{ s}^{-1}$  már reális nagyságrend (a frekvencia közel 1600 Hz), de, mint látható, a kopás szinte azonos az előző lassú ingadozással, természetesen finomabb, az ábrán nem is érzékelhető lépcsőzéssel. A lényeg az, hogy a rezgésmentes alapesethez viszonyítva sokkal gyorsabb a kopás. A  $\Delta v$  különböző értékeinél ennek mértéke is különböző.

A 4. és 5. ábra adatai alapján a rezgés közben várható T élettartamnak a rezgésmentes  $T_0$  értékhez viszonyított  $T/T_0$  hányadosa meredeken csökken. Konkrét példákön végzett számítások szerint [1, 3]  $\Delta v/v_0 \approx 0,2-0,3$  könnyen előállhat, amely az élettartam jelentős csökkenését vonja maga után.

Ismételten utalni kell arra, hogy a bemutatott rezgő modell erős leegyszerűsítése a valóságos viszonyoknak. Arra mindenesetre alkalmas, hogy érzékeltesse azt a sajátos, többnyire káros hatást, amelyet a megmunkáló rendszerben több okból jelentkező, itt tipikus példaként a lemezes forgácsképződésre visszavezetett vibráció a szerszámok kopására kifejt. Egyik lényeges eleme lehet ez azoknak az okoknak, amelyek a forgácsoló szerszámok élettartamánál gyakran tapasztalt jelentős szórást előidéznek, és amelyek a technológusoknak komoly gondokat okoznak. E gondok pedig azáltal enyhíthetők, hogy csökkentjük a  $\Delta v$ , azaz a 3. ábrán a  $\dot{v}$

nagyságát, amely a szerkezet merevségének növelésével valósítható meg.

#### 4. ÖSSZEFOGLALÁS

A szerszámkopás sebességénél tapasztalható jelentős szórás okainak tanulmányozása közben arra a megállapításra jutottunk, hogy a forgácsleválasztásnál gyakran megjelenő rezgés gerjesztésnek az élettartamra komoly hatása lehet. Felhasználva a szerszámok hátkopására kidolgozott új, kopásmérésekkel is igazolt modellünket, számításokkal alátámasztott elemzést végeztünk a vibráció kopásra gyakorolt hatásának feltárására. Megállapítható volt, hogy a vibráció, annak frekvenciájától lényegében függetlenül, a szerszám kopását számottevően gyorsítja, amely a szerkezet merevségének növelésével mérsékelhető.

#### KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A tanulmány a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

#### IRODALOM

- [1] PÁLMAI Z., CSERNÁK G.: Chip formation as an oscillator during the turning process. Journal of Sound and Vibration 326 (2009) pp.809-820.
- [2] PÁLMAI Z.: A szerszám anyagok kopási folyamatai forgácsoláskor. KL Kohászat 144. évf. (2011) No. 5. pp. 5-9.
- [3] CSERNÁK G., PÁLMAI Z.: A forgácsképződés, mint oszcillátor esztergálásnál. Gépgyártás XLVIII. (2008) No. 3. pp.75-80.
- [4] KOMANDURI R., T. SCHROEDER, J. HAZRA, B. F. von TURKOVICH: On the catastrophic shear instability in high-speed machining of an AISI 4340 steel. Journal Engineering for Industry 104 (1982) pp.121-131.
- [5] KOMANDURI R., Z.-B. HOU: On thermoplastic shear instability in the machining of a titanium alloy (Ti-6Al-V). Metallurgical and Materials Transactions A Vol. 33A (2002) pp.2995-3010.
- [6] SHAW, M.C., A. VYAS: The Mechanism of Chip Formation with Hard Turning Steel. Annals of the CIRP. Vol. 47/1 (1998) pp.77-82.