

# FOGASKEREKÉK ÉLETTARTAMÁT BEFOLYÁSOLÓ NÉHÁNY HATÁS VIZSGÁLATA FÁRASZTÓ KÍSÉRLETTEL

ZSÁRY Árpád

Budapesti Műszaki Egyetem, Közlekedésmérnöki Kar  
Gépelemek Tanszék

## Bevezetés

Fogaskerekes hajtóművek területén az elmúlt években széles körű kutatómunkát végeztek a tanszék munkatársai. A kutatás elsősorban a fogaskerekek vonatkozásában a terhelhetőség növelési, ill. a súly, önköltség stb. csökkentési lehetőségeire terjedt ki. Ennek során anyagmegválasztási, hőkezelési és fogazásgeometriai kérdések, valamint kenéstechnikai vonatkozások is előtérbe kerültek.

A kutatási munkának egyik igen fontos részterülete a fogaskerekek élettartam számításához szükséges kiindulási alapadatok megállapítása volt. A kérdés aktualitását indokolja a fogaskerekes hajtóművek világpiaci szinten jelentkező hallatlan gyors terhelhetőség növekedése, másrészt a hazai exportlehetőségek segítése. Ez elsősorban az edzett fogaskerekes hajtóművek fejlesztését jelenti.

Az alapprobléma a méretezéskor a fogtőszilárdság ismerete, amelyre a hazai anyagszabványok semmilyen adatot nem tartalmaznak, mégis szükséges értékének ismerete, különösen betétedzett állapotban.

A vizsgálatok során — amennyiben lehetőség volt — néhány élettartamot befolyásoló paraméter hatását is megállapítottuk.

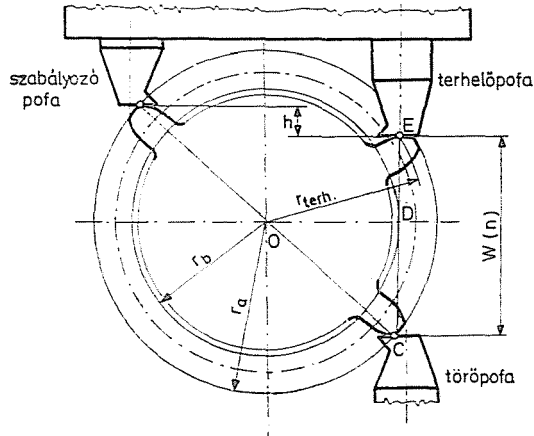
Az utóbbi évek során végzett, különböző fogaskerekekre kiterjedő vizsgálataink egyes területeit — a részletek megadásával — különböző helyeken publikáltuk. Jelenleg összefoglalóan ismertetjük a fogtő geometriai kialakítás, a kapcsolószög, a fogszám, a modul és a fogfelület-köszörülés hatását — vizsgálataink alapján — a kifáradási határra.

## A vizsgálógép és a terhelőberendezés

A vizsgálatokat részint a VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig gyártmányú ZDM- Pu40 típusú hidraulikus fárasztóberendezésen, részint pedig az Amsler-típusú elektronikus rezonancia pulzátoron végeztük el.

A terhelőberendezést egy korábban megvalósított rendszer továbbfejlesztéseként, amely lényegében a többfögmérés elvén alapult, alakítottuk ki.

Az adott esetben a többfogmérés elvének megfelelő közrefogás két pofával (törőpofa, terhelőpofa) aszimmetrikusan történik. A közrefogandó fogak száma és a pofák felfekvő síkja közötti normális távolság a szokásos többfogméréshez képest rendszerint kismértékben növelt értékű (1. ábra). A beállítás páros és páratlan fogszámú kerekre esetére kicsit eltérő.



1. ábra

A közrefogandó fogak számát úgy választjuk meg, hogy a pofák érintkezése — a fogazat középkörétől eltérően — nagyobb sugáron és aszimmetrikusan jöjjön létre. A törőpofa a fogat a fejkör közvetlen közelében, a terhelőpofa ennél kisebb sugáron terheli. Így ennek a fognak a tövében kisebb feszültség ébred, és a vizsgált fog tönkremenése a valószínűbb. Ez azért is fontos, mert a vizsgált foggal érintkező törőpofa közvetlenül a gép dinamométerére fekszik fel, így ez a terhelés viszonylag nagy pontossággal mérhető.

A vizsgált fogaskerék megfelelő elhelyezését egy harmadik (szabályozó) pofa adja, amelynek magasságát a vizsgált fogaskerék geometriai adatai határozzák meg. A szabályozópofa a terhelés felvitelében nem vesz részt. A terhelőberendezés az 1. ábrán látható, páros fogszám esetén.

A geometriai viszonyok alapján a terhelő- és a törőpofák által közrefogott fogak száma:

$$n < k + \frac{2CD - W(k)}{m \pi \cos \alpha}, \text{ ahol } k \text{ a többfogméretnél közrefogott fogak száma.}$$

Ennek ismeretében a terhelő- és a szabályozópofák közötti magasság különbség páros fogszámnál

$$h = 2 \sqrt{r_a^2 - r_b^2} - W(n)$$

páratlan fogszám esetén

$$h' = h - 0,5 p_b, \text{ ahol } r_a \text{ a fejkörsugár, } r_b \text{ alapkörsugár, } p_b \text{ alaposztás.}$$

### A vizsgálat és az eredmények kiértékelési módszere

A fogaskerekek terhelési tartománya lüktető jellegű volt, a minimális terhelés olyan behatárolásával, amely még egyértelműen biztosította a fogak és a pofák megfelelő felfekvését.

A vizsgálatra rendelkezésre álló fogaskerekek számától és a vizsgálat jellegétől függően vagy szintfárasztást végeztünk 8 . . . 14 vizsgálati pont felvételével, vagy pedig a teljes kifáradási görbe megállapításához 40 . . . 50 mérési pontot határoztunk meg. A kiértékelés minden esetben a matematikai statisztika módszerét használta fel.

Megállapítottuk az egyes élettartam adatokhoz tartozó törési valószínűségeket: a „ $k$ ” változat „ $j$ ” szintjén nyert valamely adat esetében a törési valószínűség

$$P_{kji} = \frac{i}{n_{kj} + 1} \cdot 100\%$$

( $k = \text{const.}, j = \text{const.}, i = 1, 2 \dots n_{kj}$ ) a képletben  $n_{kj}$  a „ $k$ ” változat „ $j$ ” szintjén nyert adatok száma.

Az élettartam-adatok eloszlása a tapasztalat szerint leginkább a logaritmikus normáeloszlás törvényszerűségeit követi, ahol az egyes  $N_i$  élettartam-adatokból számított  $\ln N_i$  értékek Gauss-eloszlásúak.

Kis halmazok ( $n \cong 10$ ) esetén a logaritmikus normáeloszlás várható középértéke:

$$\overline{\ln N} = \frac{\sum_{i=1}^n \ln N_i}{n}$$

Az empirikus szórás:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\ln N_i - \overline{\ln N})^2}{n}}$$

és a korrigált empirikus szórás:

$$\sigma^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\ln N_i - \overline{\ln N})^2}{n - 1}}$$

A várható középérték és a korrigált empirikus szórás ismeretében kiszámíthatók az 50%-os, 15%-os, 85%-os, 2%-os és 98%-os törési valószínűségi élettartam-adatok:

$$N_{50\%} = e^{\overline{\ln N}}; \quad N_{15\%} = \frac{N_{50\%}}{e^{\sigma^*}}; \quad N_{85\%} = N_{50\%} \cdot e^{\sigma^*};$$

$$N_{2\%} = \frac{N_{50\%}}{e^{2\sigma^*}}; \quad N_{98\%} = N_{50\%} \cdot e^{2\sigma^*}$$

Az egyes élettartam törési valószínűségpontokat olyan diagramban ábrázoltuk, amelynek vízszintes tengelye logaritmikus beosztású volt, függőleges tengelyére pedig a Gauss-féle standard normál eloszlás inverz függvényét mértük fel.

A felvitt pontok segítségével elsősorban illeszkedésvizsgálatot végeztünk. A logaritmikus-normáleloszlást elfogadtuk, ha a jelzett diagramokba berajzolt pontok közelítéssel egy egyenesen feküdtek.

A továbbiakban a már említett  $N_{2\%}$ ,  $N_{15\%}$ ,  $N_{50\%}$ ,  $N_{85\%}$  és  $N_{98\%}$  élettartamok bejelölése és összekötése útján berajzoltuk az egyes vizsgálati eredménycsoportok szintegyeneseit.

A  $2 \cdot 10^6$  igénybevételi számot meghaladó élettartam eredmények már nem tartoznak a szintegyenes pontjai közé. Ebben az esetben az élettartam-törési valószínűség szintegyenesét a definiált eredmények pontjaira fektetett regressziós egyenessel közelítettük.

A regressziós egyenes egyenletének ismeretében az élettartam-törési valószínűség a definiálható határértékig megrajzolható.

Továbbiakban elvégeztük az egyes vizsgálati csoportok (eloszlások) kiugró értékvizsgálatát.

Ha teljes kifáradási görbe felvétele volt a cél, akkor a kapott nagyszámú vizsgálati pont segítségével elvégeztük a kifáradási görbe vizsgálatát az úgynevezett hármadiagram-rendszer felhasználásával. Ennek megszerkesztéséhez le kell vezetni az élettartamadatokból képzett ún. redukált élettartam fogalmát, amely  $U = (ch \lg N)^{-1}$ .

A redukált élettartamok eloszlása a Gauss-féle normál eloszlással közelíthető, így az eloszlásfüggvény

$$F_{(x)} = P(U \leq x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi S_u^2}} \int_{x=0}^x \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{x - \bar{U}}{S_u} \right)^2 \right\} dx$$

ahol:  $\bar{U}$  — a redukált élettartamok várható értéke

$S_u$  — a redukált élettartamok szórása.

Ennek az eloszlásnak a linearizáló valószínűségi diagramja olyan Gauss-papír, amelynek vízszintes tengelye torzított logaritmikus léptékű ( $U = -(ch \lg N)^{-1}$ ) és  $U$ -ra nézve lineáris. Efelett helyezkedik el egy olyan diagram, amelynek független változója szintén az  $U$  és függő változója a feszültség, a függőleges tengely lineáris léptékű. A harmadik diagram függőleges tengelye

az előzőével közös, vízszintes tengelyének beosztása a standardizált normál-eloszlás inverzének felel meg (lásd 4. ábra).

A linearizáló valószínűségi diagramba a vizsgálati eredményeket felvive a (torzított) színtegyenések berajzolhatók. A kívánt valószínűségű pontokat a felső diagramra a megfelelő feszültség vízszintesére felvetítve a bal felső diagramban a linearizált kifáradási görbék megrajzolhatók. Ennek pontjait a jobb felső diagramba átvétítve viszont berajzolhatók az állandó élettartamhoz tartozó törési valószínűségek.

Mindazon vizsgálati csoportok esetében, ahol az eloszlások adatai közvetlenül rendelkezésre álltak, elvégeztük a szükséges statisztikai próbákat is.

Az összehasonlításra kijelölt eloszlások esetében elsősorban vizsgáltuk a szórások egyezőségét az  $F$ -próba kétoldali változatával, amelynek próbastatisztikája ha a „ $k$ ” és „ $m$ ” változat esetében a „ $j$ ” szinten nyert eloszlásokat hasonlítjuk össze:

$$F^* = \max \left[ \frac{\sigma_{kj}^{*2}}{\sigma_{mj}^{*2}} ; \frac{\sigma_{mj}^{*2}}{\sigma_{kj}^{*2}} \right] \geq 1$$

és a szórások egyezőségét elfogadtuk, ha  $F^* \leq F_{1-\varepsilon}$ , ahol az utóbbi az  $F$ -próba táblázati értéke, a választott kétoldali 90%-os szignifikanciaszinten,  $m_{kj} - 1$  és  $n_{mj} - 1$  szabadságfokokhoz.

A szórások egyezősége esetén a várható értékek összehasonlítását végeztük el a kétmintás  $t$ -próba segítségével. Ennek próbastatisztikája az előző vizsgálati csoportokra, hogy  $\ln \overline{N}_{kj} > \ln \overline{N}_{mj}$ , a következő:

$$t(n_{kj} + n_{mj} - 2) = \frac{\ln \overline{N}_{kj} - \ln \overline{N}_{mj}}{\sqrt{(n_{kj} - 1) \sigma_{kj}^{*2} + (n_{mj} - 1) \sigma_{mj}^{*2}}} \cdot \sqrt{\frac{n_{kj} \cdot n_{mj} \cdot (n_{kj} + n_{mj} - 2)}{n_{kj} + n_{mj}}}$$

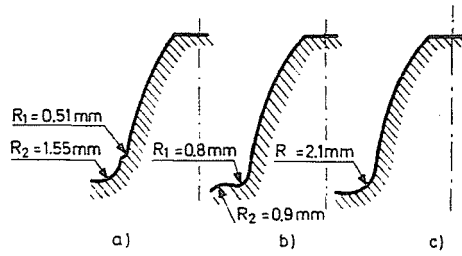
A várható értékek közötti különbséget kimutatottnak tekintettük, ha

$$t_{(n_{kj} + n_{mj} - 2)} > t_{(1-\varepsilon)},$$

ahol  $t_{(1-\varepsilon)}$  az  $(n_{kj} + n_{mj} - 2)$  szabadságfokú Student-féle eloszlás táblázati értéke a választott 90%-os szignifikanciaszinten.

A szórások különbözősége esetén — egzakt próba hiányában — a Welch-féle statisztika használható.

A vonatkozó számításokat, megfelelő programok segítségével, az EMG 666 típusú számítógéppel végeztük el.



2. ábra

### A kapott eredmények alapján tehető megállapítások

1. *Fogtő kialakítás* három változata került vizsgálatra (2. ábra). A fogazat adatai:  $z = 25$ ,  $m = 4,5$ ,  $\alpha = 20^\circ$ , profileltolástényező  $x_1 = +0,562$ , anyaga BC 3 krómáccél ill. BNC 3 krómnikkel acél betétedzve, köszörülve.

Szabványos fogtőlekerekítés (2a. ábra), a fogazószerszám és a köszörűkő lépcsőt hagy;

végigköszörült fogoldal (2b. ábra);

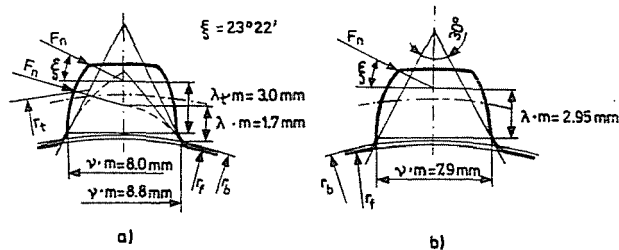
protuberanciás kivitelű fogtő (2c. ábra), a fogtő lekerekítés a két fogoldalhoz készíthető lehetséges legnagyobb kör.

A fárasztási eredmények szerint a különböző fogtőkialakítások nem befolyásolták számottevően az élettartamot, a BC 3 és BNC 3 között — az utóbbi javára szignifikáns különbség adódott.

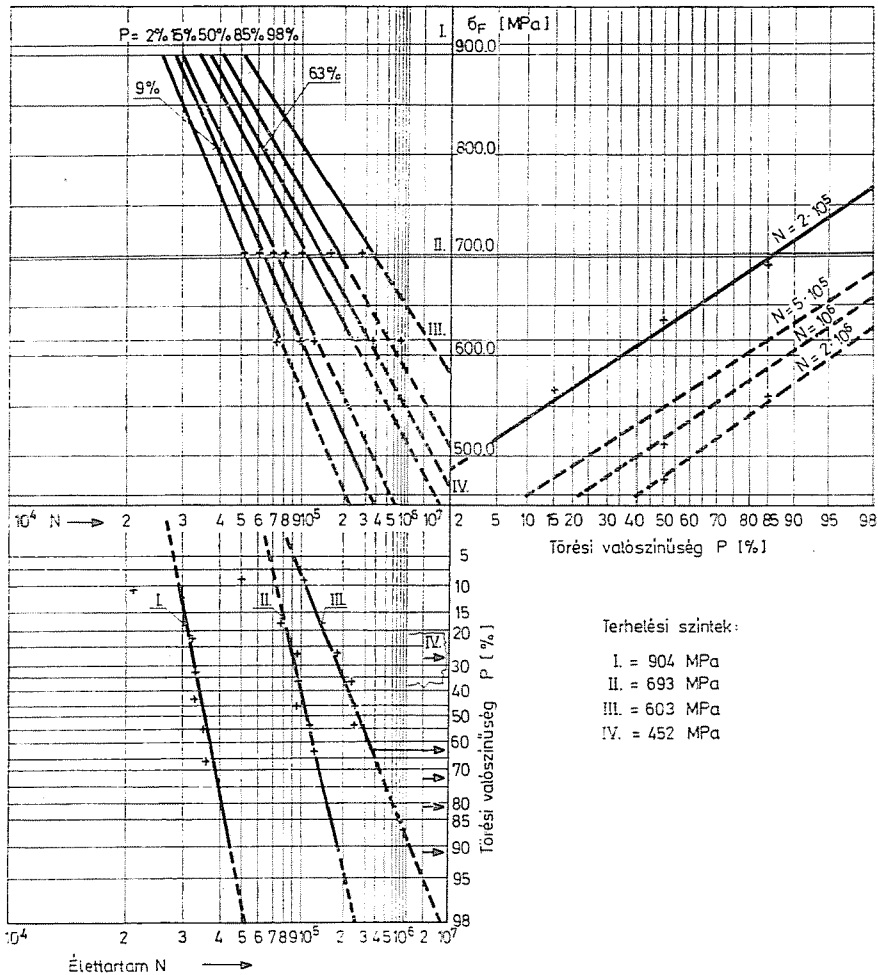
2. Sebességváltó kapcsolóagyának fogazatvizsgálata a kapcsolószög növelésével. A fogazat adatai:  $z = 17$ ,  $m = 4,5$ , fogmagasság tényező 0,5, lábhezag-tényező 0,25, alapprofilszög  $20^\circ$ , illetve  $35^\circ$ . Anyag: BC 3 betétben edzhető krómáccél.

A kiértékeléshez meg kell határozni a fogalak tényezőt és a fogtőfeszültségeket (3. ábra).

A kapcsolószög növelés  $20^\circ$ -ról  $35^\circ$ -ra szignifikáns különbséget eredményezett az élettartam-adatokban.



3. ábra



4. ábra

3. Kiterjedt vizsgálatokat végeztünk BC 3 anyagból készült betétedzett köszörült és köszörülés nélküli fogaskerekeken, amelyek változatai a következők voltak:

„A” változat  $z = 34$ ,  $m = 4$ ; „B” változat:  $z = 17$ ,  $m = 4$ ; „C” változat:  $z = 34$ ,  $m = 2,5$ ; „D” változat:  $z = 55$ ,  $m = 2,5$ ; és „E” változat:  $z = 17$ ,  $m = 8$ .

Valamennyi kerék egyenes elemi fogazatú ( $\alpha = 20^\circ$ ,  $h_x^* = 1,0$ ,  $c^* = 0,25$ ).

A fogprofilokon mérhető felületi érdességek a következők: a köszörült kiviteleknél átlagosan  $0,5 \dots 0,6 \mu\text{m}$ , érdességmaximumok  $1,5 \dots 2,0 \mu\text{m}$ , köszörülés nélküli kiviteleknél átlagosan  $2 \dots 3 \mu\text{m}$ , érdességmaximumok  $8 \dots 10 \mu\text{m}$ .

Az „A” alapváltozatra meghatároztuk a törési valószínűségekhez tartozó kifáradási görbéket és megszerkesztettük a hármas diagramokat (4. ábra köszörülés nélküli kivitel).

Az adatokat vizsgálva, grafikus összehasonlítások és a statisztikai próbák alapján, egyértelműen megállapítható, hogy azonos modulú, de *különböző fogszámú* fogaskerekerek fogtőfeszültségei kedvezőbbek a nagyobb fogszámú kerekerek esetén. Tehát a nagyobb fogszámú kerék terhelhetősége a fogtőfeszültség alapján nagyobb.

Az azonos fogszámú, de *különböző modullal* gyártott fogaskerekerek összehasonlító vizsgálata eredményt nem szolgáltatott, szignifikáns különbség nincs.

Az azonos geometriájú *köszörült és köszörülés nélküli* kivitelek összehasonlító vizsgálatának eredményei alapján megállapítható, hogy a köszörülés hatása nem jelentős, kisebb, mint az egyéb befolyásoló tényezőké.

A fogtővek geometriai kialakítása megfelelt a szabványos fogazószer számmal előállítható görbéknek, a köszörült kivitelek fogtővében kőkfutás nem volt megállapítható. A köszörült és köszörülés nélküli kivitelek foggörbéi azonos modul és fogszám esetén gyakorlatilag egybevágók.

A fogtőrepedések helye, az esetek többségében, a várakozásnak megfelelő volt, a repedések a fogtő azon helyének közelében indultak meg, ahol a fog szimmetriatengelyével  $30^\circ$ -ot bezáró egyenes érinti a fogtőgörbét.

Dr. Zsáry Árpád tanszékvezető egy. docens, a műszaki tudományok kandidátusa