

A KISMÉRETŰ MŰANYAG FOGASKEREKEK MELEGEDÉSÉNEK MÉRÉSE

MEASURING THE HEATING OF SMALL PLASTIC GEARS

Dr. Bihari János*, Marada Imre**

ABSTRACT

Small plastic gears are straight-toothed gears with an involute profile and a module of no larger than 0.5 mm. These gears are made of some type of plastic, usually POM or PA.

There is no international standard for the calculations required for the reliable design of plastic gears; instead, regionally accepted guidelines, national guidelines or guidelines within individual companies are used. This means that essentially every major plastic gear manufacturer has its own calculation method and guidelines. This situation poses a major obstacle for the plastic gear industry, as it hinders the easy exchange of design knowledge and information.

Among the forms of damage to plastic gears, the literature considers failure due to tooth heating to be one of the most common. Therefore, we compared the values calculated from the heating formulas in the literature with the measurement results.

1. BEVEZETÉS

A kisméretű műanyag fogaskerekek ennek a cikknek az értelmezésében olyan evolvens profilú, egyenes fogú fogaskerekek, melyeknek modulja nem nagyobb 0,5 mm-nél. Ezeknek a fogaskerekeknek az alapanyaga valamilyen műanyag, általában POM vagy PA [1].

A műanyag fogaskerekek megbízható kialakításához szükséges számításokhoz nem áll rendelkezésre nemzetközi szabvány, hanem csak régióként elfogadott, nemzeti szintű vagy egyes cégeken belüli irányelveket használnak [2]. Így lényegében minden nagyobb műanyagfogaskerék-gyártónak megvan a maga számítási módszere és segédlete. Ez a helyzet nagy akadályt jelent a műanyag fogaskereket tervezők számára, mivel akadályozza a tervezési ismeretek és információk egyszerű cseréjét [3] [4] [5].

A kisméretű műanyag fogaskerekek károsodási formái közül a szakirodalom a fog melegedéséből származó tönkremenetelt tartja az egyik leggyakoribbnak [6][7]. Ezért a szakirodalomban szereplő melegedési képletekből származó értékeket vetettük össze mérési eredményekkel.

2. A LEGFONTOSABB MÓDSZEREK

A műanyag fogaskerekek melegedésének meghatározására műanyag fogaskerekek tervezését segítő katalógusok és irányelvek vagy számítási módszert, vagy kísérletek és számítások kombinációját használják.

Európában a műanyag fogaskerekek tervezésének alapjául sokáig a VDI 2545 irányelv szolgált. Ez az irányelv 1981-ben jelent meg, és 1996-ban vonták vissza. Mivel a visszavonása után nem állt rendelkezésre más hasonló irányelv, a gyakorlatban egészen a VDI 2736 irányelv 2016-os megjelenéséig általában ezt használták, a mai napig fontosnak számít.

A VDI 2545 irányelv szerint a műanyag fogaskerekek melegedését a (1) egyenlettel lehet kiszámítani [6] [8].

$$\vartheta_{1,2} = \vartheta_k + 136 \cdot P \cdot \mu \cdot \frac{1+u}{z_2+5} \cdot \left(\frac{17100}{b \cdot z_{1,2}} \cdot \frac{k_2}{(v \cdot m)^{\frac{1}{3}}} + 6,3 \cdot \frac{k_3}{A} \right) \quad (1)$$

Ahol:

- ϑ_k - a környezet hőmérséklete [$^{\circ}\text{C}$],
- P - a hajtás teljesítménye [kW],
- μ - a súrlódási tényező,
- u - a fogsámvizony,
- z - a fogsámszámok,
- b - a fogszélesség [mm],
- v - a fogaskerék görbülőköri sebessége [m/s]
- m - a modul [mm],
- A - a hajtómű belső felülete [m^2]
- k_2 - az anyagtényező,
- k_3 - a hajtómű tényező [$\text{m}^2\text{K/W}$],
- κ - a párosított fogaskerekek anyagait veszi

figyelembe.

Mivel évekig nem állt rendelkezésre általánosan elfogadott módszer a melegedés számításához, több alapanyaggyártó is kidolgozott olyan segédanyagokat, amelyek jól alkalmazhatóak adott határokon belül. Ezek közül a Licharz cég módszere a VDI 2545 egy tapasztalati adatok alapján módosított változata. Ezt a (2) egyenlet mutatja be [4].

$$\vartheta_{1,2} = \vartheta_k + 136 \cdot P \cdot \mu \cdot f \cdot \frac{1+i}{z_{1,2}+5 \cdot i} \cdot \left(\frac{17100}{b \cdot z_{1,2}} \cdot \frac{k_2}{(v \cdot m)^{\frac{1}{3}}} + 7,33 \cdot \frac{k_3}{A} \right) \quad (2)$$

Ahol:

- i - az áttétel,
- f - a hajtómű szakaszos üzemet figyelembe vevő korrekciós tényező.

* egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet

** PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet

2016-ban aztán végül megjelent a VDI 2736 irányelv. A VDI 2736-ban szereplő melegedési képletet Hachmann és Strickle munkássága alapján hozták létre [9]. Manapság ezt a képletet használják a melegedés számítására. A VDI 2736 szerinti számítási módszert a (3) egyenlet tartalmazza [10].

$$\vartheta_{1,2} = \vartheta_k + H_v \cdot P \cdot \mu \cdot \left(\frac{k_g}{b \cdot z \cdot (v \cdot m)^{\frac{3}{4}}} + \frac{R_{\lambda,G}}{A_G} \right) \cdot ED^{0,64} \quad (3)$$

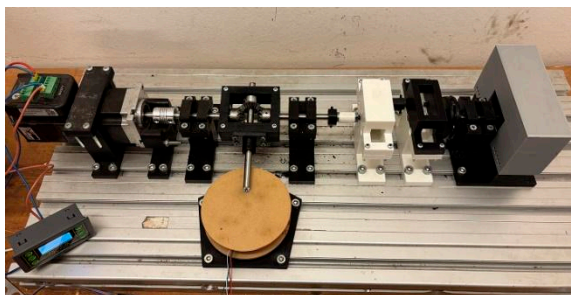
Ahol:

- A_G - a hajtómű belső felülete [m^2]
- k_g - a hőátadási tényező [$K(m/s)^{0,75} mm^{1,75}/W$], értékét táblázat alapján lehet megállapítani,
- $R_{\lambda,G}$ - a hajtómű tényező [m^2K/W], értékét táblázat alapján lehet megállapítani,
- ED - a relatív terhelési ciklus, azt állapítja meg, hogy a hajtómű folyamatos vagy szakaszos üzemű-e,
- HV - a fog veszteségi foka.

Említést érdemel még a japán JIS B 1759 szabvány. Bár ebben a szabványban nem szerepel külön számítás a műanyag fogaskerek melegedésére, a szabvány a hőmérséklet hatását a fogaskerék anyagának fogtónál vett megengedett hajlítófeszültségénél veszi figyelembe egy környezeti hőmérsékleti tényező és egy hőmérséklet-növekedési tényezővel. Mindkettőnél a szabvány alapján méréseket kell végezni etalon paraméterekkel és ezeket az eredményeket kell összehasonlítani a tényleges paraméterekkel. Így a JIS B 1759 szabvány módszeréről elmondható, hogy nagy mértékben különbözik a VDI irányelvekben használt módszerektől, hiszen a JIS B 1759 módszerében a tényezők nagy része nem korábbi adatokat tartalmazó táblázatokból és diagramokból származik, hanem leírja, hogyan lehet olyan méréseket végezni, hogy a szilárdságot befolyásoló tényezőket megkapjunk [11].

3. A MELEGEDÉS MÉRÉSE

A melegedés méréséhez használt berendezést az 1. ábra mutatja. A berendezés egy meghajtó motorból, egy nyomaték-mérő egységből, a mérendő fogaskereket tartalmazó hajtóműből és a terhelőegységből áll, amely egy folyadékba merülő vízkerék. A fogaskerek melegedésének méréshez egy Testo 872 hőkamerát alkalmaztunk. A külső hőmérsékletet mérésére és ellenőrzésére egy egyszerű digitális hőmérsékletmérőt használtunk.



1. ábra A melegedés méréséhez használt berendezés

Minden mérés során két $m=0,5$ mm modullal rendelkező fogaskereket mértünk. A hajtott oldali fogaskerék fogszáma 30, a másiké 50 volt. A fogaskerek fogszélessége 3 mm volt, anyaguk POM. A fordulatszám és a terhelés is minden mérés esetén más és más volt. Emellett, mivel a méréseket különböző napokon végeztünk el, hogy egy mérés után legyen ideje a berendezésnek lehűlni, ezért a környezeti hőmérséklet is különbözött az egyes mérések során.

Így végeztünk el öt mérést, amit az 2. fejezetben bemutatott képletekből kapott eredményekkel vetettük össze. A méréseket úgy végeztük el, hogy első körben mértünk 30 percet, aztán 30 percig nem leállítva magára hagytuk a berendezést, majd újabb 10 percet mértünk, ezt követően újabb 30 percre hagytuk a berendezést futni, végül egy újabb 10 percig mértük a hőmérséklet változását. A mérések során a hőkamerát beállítottuk, hogy az úgynevezett „hot spot”-ot mérje, azaz a legmelegebb pontot, mely a fogaskerek érintkezési pontjának környezetében volt.

Az így mért értékeket értékeltük ki öt szakaszban. Az I. szakasz a mérés kezdeti 10 percét jelenti, a II. szakasz a következő 10 percet, a III. szakasz pedig a harmadik 10 percet. A IV. szakasz az első 30 perces mérés nélküli futás utáni 10 percet jelöli, az V. szakasz pedig az utolsó 10 perces hőmérsékletmérést.

A mérések paramétereit az 1. táblázat, a képletekkel számított hőmérséklet értékeket a 2. táblázat tartalmazza.

1. táblázat A mérések paramétereit

Mérés	Tangenciális erő a fogon [N]	A kiskerék fordulatszám [1/min]	A külső hőmérséklet [°C]
1. mérés	0,0413	273,73	25,1
2. mérés	0,7284	660	22,8
3. mérés	0,3991	500	22,1
4. mérés	0,114	360	21,6
5. mérés	0,2615	600	21,3

2. táblázat A képletekkel kapott eredmények az egyes mérési esetekre

Mérés	VDI 2545 [°C]	Licharz [°C]	VDI 2736 [°C]
1. mérés	25,15	25,27	25,27
2. mérés	24,39	26,45	26,46
3. mérés	22,84	23,96	23,97
4. mérés	21,77	22,09	22,09
5. mérés	21,84	22,58	22,58

A VDI 2736 irányelv felállításkor is hasonló mérést használtak a hőmérséklet képletének meghatározásához. Az irányelv 4 számú része hőkamera alkalmazását mutatja be, kenés nélküli esetben. A méréseket nem megszakított futtatásokkal végezték el, azt a kvázistacionárius állapotot keresték, ahol hőegyensúly áll be, azaz a fogaskerek nem melegednek tovább. Ezt tapasztalatok alapján 20 és 45 perc közötti időtartam esetén érték el [12].

4. A MÉRÉSEK EREDMÉNYEI

4.1. Első mérés

A mérések azt mutatták, hogy az I. szakaszban a hőmérséklet 26,3 és 27,2 °C között változott, 26,7 °C-os átlaggal. Látható, hogy már a mért hőmérsékletek minimuma is több, mint 1 °C-kal volt melegebb, mint a képletekkel számított hőmérsékletek.

A II. szakaszban a mért hőmérséklet minimuma és maximuma is 1 °C-kal nőtt. Az átlaghőmérséklet ebben a szakaszban 26,8 °C volt. A maximum a mérés további szakaszaiban már nem nőtt tovább, megállt 27,3 °C-on.

A III. szakaszban tovább növekedett a mért értékek minimuma, ismételten 1 °C-kal. A III. szakaszban mért hőmérsékletek átlaga 26,8 °C volt.

A minimum érték a IV. szakaszban is 1 °C-ot nőtt. Az átlagérték itt 26,9 °C volt. A maximum már nem növekedett.

A minimum értékének 1 °C-os növekedése az V. szakaszban is folytatódott. Az átlagérték itt is 26,9 °C volt.

4.2. Második mérés

Az átlaghőmérséklet ebben a szakaszban 26,1 °C volt. Bár a minimum érték a VDI 2545-öt leszámítva kisebb, mint a képletekkel számítottak, a maximum értéke mindet túllépi.

A II. szakaszban a hőmérséklet 25,7 és 27,9 °C között változott, 26,8 °C-os átlaggal.

A III. szakaszban tovább folytatódott a maximum és minimum érték növekedése. Előbbi 28,2, utóbbi 26,3 °C lett. A mért hőmérsékletértékek átlaga is növekedett, ez 27,2 °C lett.

A IV. szakasz már jelentős hőmérsékletnövekedést mutat, mivel ez a mérés történt a III. szakasz utáni 30 perces mérés nélküli futtatás után. A minimum értéke itt már túlhaladta minden esetben a képletekkel számolt hőmérsékletet a 27,6 °C-os értékével. A maximum értéke 30,4 °C lett. A IV. szakaszban mért értékek átlaga 29,1 °C volt.

Az V. szakaszban a minimum értéke 27,9 °C-ra növekedett. A maximum értéke már csak 0,1 °C-ot nőtt, 30,5 °C-ra. Ez azt jelentheti, hogy a maximum értéke már további futás esetén sem növekedne jelentősen. Az átlagérték az V. szakaszban 29,5 °C volt.

4.3. Harmadik mérés

Az I. szakaszban a hőmérséklet 23,3 és 24,4 °C közötti értékeket vesz fel, 23,8 °C-os átlaggal. A Licharz és a VDI 2736 képleteivel kapott eredmény ebbe a tartományba esik, de a maximumnál kisebb. A VDI 2545 szerint számolt érték már ezt a tartományt sem éri el.

A II. szakaszban a minimum értéke 23,5 °C-ra, a maximum értéke 24,7 °C-ra növekedett. Az átlagérték 24 °C volt.

A III. szakaszban a hőmérséklet 23,8 és 24,8 °C közötti értékeket vett fel. Az átlag ebben a szakaszban 24,3 °C volt.

A maximum és minimum értéke már a IV. és V. szakaszra sem változott. Elmondható így tehát, hogy a képletekkel számított értékek a Licharz és a VDI 2736 esetén körülbelül 0,1 °C-kal voltak nagyobbak a mért értékek minimumától, a maximumot azonban nem érték el. A IV. szakaszban az átlag 24,3 °C volt, az V. szakaszban 24,4 °C.

4.4. Negyedik mérés

Az I. szakaszban a legkisebb mért hőmérséklet 22,1 °C volt, ami 0,01 °C-kal nagyobb, mint a képletekkel kapott legnagyobb érték. A mért értékek maximuma 23,1 °C volt. Az I. szakaszban mért értékek átlaga 22,5 °C volt.

A II. szakaszban a minimum és a maximum értéke is 0,1 °C-kal nőtt. Az átlag értéke 22,8 °C lett.

A III. szakaszban a minimum 22,4, a maximum 23,5 °C értéket vett fel. A mért hőmérsékletek átlagos értéke 23 °C volt.

A IV. szakaszban a legkisebb mért hőmérséklet 22,6 °C volt, a legnagyobb pedig 23,6 °C. Az átlag 23,1 °C lett.

Az V. szakaszban sem a minimum, sem a maximum értéke nem változott. Az átlag 0,1 °C-kal növekedett a IV. szakaszhoz képest.

4.5. Ötödik mérés

Az I. szakaszban a legkisebb mért hőmérséklet 22 °C volt. Ezt az értéket a VDI 2545 képletből számított érték nem érte el, a másik kettő képletéből számított hőmérséklet azonban igen. Azonban egyik számított eredmény sem érte el a maximum értékét, ami 23,2 °C volt. A mért értékek átlaga ebben a szakaszban 22,5 °C volt.

A II. szakaszban a maximum és a minimum értéke is 0,2 °C-kal nőtt. Az átlagos érték ebben a szakaszban 22,8 °C volt.

A III. szakaszban újabb 0,2 °C-kal nőtt a maximum és a minimum értéke. Az átlagos érték itt már 23,1 °C volt.

A IV. szakaszban mind a maximum, mind a minimum értéke jelentősen megnőtt. A legkisebb mért érték 23,1 °C volt, ami már meghaladja az összes

számított értéket. A legnagyobb mért érték pedig 24,1 °C volt. A mért értékek átlaga 23,6 °C volt.

Az V. szakaszra a maximum értéke nem változott, a minimumé azonban még 0,1 °C-kal nőtt. Az átlagos érték 0,2 °C-kal nőtt 23,8 °C értékre.

5. KÖVETKEZTETÉSEK

Összességében elmondható, hogy a mért értékek maximuma minden mérésnél jelentősen meghaladta a képletekből számított értékeket. A Licharz és a VDI 2736 szerinti képletekből kapott eredmények egyes esetekben a mért tartományokon belül voltak, míg a VDI 2545 esetében ez sohasem következett be. Azonban a kisméretű műanyag fogaskerekek melegedésének szempontjából nem elég, ha a melegedés számítására használt képletek belesznek a mérési tartományba. A maximum értékének minél jobb megközelítése lenne a céljuk, ugyanis a műanyagok esetében a hőmérsékletnek nagyobb a hatása a szilárdsági és alakváltozási jellemzőkre, mint a fémeknél. Ezért nem hagyagolható el, hogy mi az a legnagyobb hőmérséklet, amit működés közben a fogaskerekek elérnek. A következtetésünk az, hogy erre az esetre egy új számítási módszert kellene kidolgozni. Ehhez sajnos jelenleg nem állnak rendelkezésünkre megfelelő eszközök.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Ebben a cikkben a kisméretű műanyag fogaskerekek melegedésével foglalkoztunk, mivel a műanyag fogaskerekeknek a fog túlzott melegedéséből származó megolvadása jelenti az egyik fő okot, illetve a jelenleg használt irányelvek és gyártói katalógusok nem adnak megfelelő számítási képleteket a 0,5 mm vagy annál kisebb modulú fogaskerekek esetével.

A cikkben először bemutattuk a jelenleg legtöbbször használt módszereket és képleteiket.

Ezután öt mértést végeztünk, különböző terhelési esetekre, amiket a képletekből kapott eredményekkel vetettünk össze.

Az eredmények azt mutatták, hogy a mért hőmérsékletek maximuma minden esetben nagyobb volt a képletekkel számított értékeknél.

Mivel a műanyagok esetében a hőmérsékletnek nagyobb a hatása az anyagjellemzőkre, mint a fémeknél, ezért egy új képlet meghatározása lenne javasolt. Erre sajnos jelenleg nem állnak rendelkezésünkre megfelelő eszközök. De egy további kutatás részét képezheti egy megfelelő képlet létrehozása.

6. SUMMARY

In this article, we focused on the heating of small plastic gears, as melting due to excessive heating is one of the main causes of failure in plastic gears, and the guidelines and manufacturer catalogs currently in use do

not provide adequate calculation formulas for gears with a module of 0.5 mm or less.

In the article, we first presented the most commonly used methods and their equations.

We then performed five measurements for different load cases, which we compared with the results obtained from the formulas.

The results showed that the maximum measured temperatures were higher than the values calculated using the formulas in all cases.

Since temperature has a greater effect on the material properties of plastics than metals, it would be advisable to define a new formula. Unfortunately, we do not currently have the appropriate tools at our disposal. However, the creation of a suitable formula could be part of further research.

7. IRODALOM

- [1] Bihari, J.: Kisméretű műanyag fogaskerekekkel szerelt hajtóművek tűrésezési problémái, GÉP 2016/5-6., pp: 14 – 17, 2016.
- [2] Bihari, J. – Kamondi, L.: Kis méretű műanyag fogaskerekek vizsgálata, GÉP 62:(7-8), pp: 21 – 24, 2011.
- [3] Bae, I. & Kissling, U.: Comparison of strength ratings of plastic gears by VDI 2736 and JIS B 1759 – In vision of building a new international standard, 2019, 10.51202/9783181023556-1267
- [4] LICHARZ GMBH: Designing with engineering plastics. Licharz GmbH, Buchholz, Németország, 2016.
- [5] DuPont: General Design Principles – Module I., Du Pont de Nemours International SA, Genf, Svác, 2003.
- [6] Antal, M.: Műanyagok gépészeti alkalmazása II. kötet, Gépipari Tudományos Egyesület Kiadványszerkesztési és Műszaki Iroda, Budapest, 1987.
- [7] VDI 2736 Thermoplastische Zahnräder, Blatt 1, BeuthVerlag, Berlin, 2016.
- [8] VDI 2545 Zahnräder aus thermoplastischen Kunststoffen, BeuthVerlag, Berlin, 1981.
- [9] Hachmann, H., Strickle, E.: Polyamide als Zahnradwerkstoffe, Konstruktion 18 (1966) 3, S. 81-94
- [10] VDI 2736 Thermoplastische Zahnräder, Blatt 2, BeuthVerlag, Berlin, 2014.
- [11] JIS B 1759:2019 (JGMA/JSA) Estimation of tooth bending strength of cylindrical plastic gears, Japanese Standards Association, Tokyo, 2020.
- [12] VDI 2736 Thermoplastische Zahnräder, Blatt 4, BeuthVerlag, Berlin, 2016.