

Polimer/acél fogaskerekek súrlódásvizsgálata

Tárgyszavak: fogaskerék; súrlódás; kopás; vizsgálati berendezés; poliamid; poli(oxi-metilén).

Keresztes Róbert, PhD hallgató,
SZIE Gépészmérnöki Kar, Gépipari Technológiai Intézet, Gödöllő

Témavezető: **Dr. habil. Kalácska Gábor**, egyetemi docens, SZIE, Gödöllő

1. Bevezetés

A gépészetben alkalmazott berendezések üzemeltetése során számos műszaki probléma jelentkezik. A meghibásodások jelentős része az egymással érintkező felületek súrlódási – és ennek következtében fellépő – kopási folyamatokból adódik. Ezek csökkentése érdekében egyre gyakrabban alkalmaznak különböző műszaki polimerekből készült gépelemeket. Az egymással kapcsolódó és elmozduló felületek tribológiai viselkedése (súrlódás, kopás) rendkívül összetett folyamatok eredménye, melyet számos tényező befolyásolhat. Ahhoz, hogy a polimerek az alkalmazott rendszerekben előnyös tribológiai tulajdonságokkal rendelkezzenek, megfelelő anyag kiválasztást, méretezést és működési feltételeket kell biztosítani.

A hajtástechnikában, mozgásátviteleknél egyre gyakrabban alkalmaznak polimer fogaskerekeket, általában acélkerekekkel párosítva. Ismert előny a kenőanyagmentesség, a zajmentes futás, jó csillapítás, könnyű szerkezet, de nem tisztázott pontosan a polimer/acél fogaskerékpárok súrlódási folyamata, mely végső soron a hajtás hatásfokát befolyásolja. A fogaskerekek esetében a kapcsolódás jellegzetes vonása a csúszó és a gördülő súrlódás különleges kombinációja az érintkező fogak között. Ennek a dinamikus változó súrlódó rendszernek a felderítésére dolgoztam ki mérési eljárást, mellyel a polimer/acél fogaskerékpárok hatásfokváltozására is következtethetünk a mérési eredményekből.

2. A fogaskerekek mechanikai viszonyai a mérőrendszerben

A gyakorlatban használt fogaskerekek többsége evolvens fogprofillal készül. Ha a fogaskerék alapkörének érintőegyenesét az alapkörön legördítjük, akkor a gördülő

egyenes pontjai evolvens görbét írnak le, és a görbe egy szakasza alkotja a fogprofil.
A kapcsolódó evolvens fogprofilú fogaskerek adatai:

fogszám: $z_1 = z_2 = 12$,
 modul: $m = 10 \text{ mm}$,
 kapcsolószög: $\alpha = 20^\circ$,
 fogszélesség: $b = 5 \text{ mm}$ (a polimer fogaskerék ív esetén).

A fogaskerék adataiból kitűnik, hogy alámetszett kerekekről van szó. A vizsgálatokhoz azért választottam a nagy modulú fogaskereket, hogy a csúszásból és gördülésből származó súrlódási erő változásai a fogkapcsolódás során jól meghatározhatók és egyértelműek legyenek. Azonban a fogaskerek fej körátmérőjét módosítani kellett, így elkerülhető az alapkörön belüli kapcsolódás. A maximális fej körátmérő (d_{fmax}) értéke:

$$d_{fmax} = 2 \cdot \sqrt{(a_w \cdot \sin \alpha)^2 + \left(\frac{d_o}{2} \cdot \cos \alpha\right)^2} \quad [\text{mm}]$$

ahol: a_w - beállított tengelytávolság [mm]

d_o - osztó körátmérő [mm]

α - kapcsolószög [$^\circ$]

A módosított fej körátmérővel számított kapcsolószám (ε):

$$\varepsilon = \frac{\overline{AE}}{p_w \cdot \cos \alpha}$$

ahol: \overline{AE} - a kapcsolódási szakasz hossza [mm]

p_w - alapköri osztás [mm]

$$\overline{AE} = \rho_{a1} + \rho_{a2} - a_w \cdot \sin \alpha$$

ahol: ρ_{a1} - hajtókerék evolvens görbületi sugara az E pontban [mm]

ρ_{a2} - hajtott kerék evolvens görbületi sugara az A pontban [mm]

a_w - tengelytávolság [mm]

$$p_w = \pi \cdot m$$

ahol: m - modul [mm]

$$\rho_a = \sqrt{r_f^2 - r_a^2}$$

ahol: r_f - fejköri sugár [mm]

r_a - alapköri sugár [mm]

A vizsgálati terhelések értékei a polimer fogaskerek méretezésénél alkalmazott számítási eljárásokat alapul véve határozhatók meg. A vizsgálatban szereplő anyagok közül a poliamid 6 termékek azok, amelyek méretezésénél a hőmérséklet hatását fokozottabban kell figyelembe venni, így a vizsgált öntött poliamid 6 fogasív jellemzőiből

számolhatjuk a maximális terhelés nagyságát. A megengedhető tangenciális erő ($F_{\text{to max}}$) nagysága az osztókoron a Lewis összefüggés szerint a következő.

$$F_{\text{to max}} = m \cdot y \cdot b \cdot \sigma_b \cdot K_v \quad [\text{N}]$$

ahol: m - a modul [mm]

y - alaktényező

b - fogszélesség [mm]

σ_b - az anyagra megengedett hajlító feszültség [N/mm^2]

K_v - sebességtényező

A különböző tényezők és hajlító feszültség értékeket táblázatok tartalmazzák.

A fogfelületen ébredő Hertz-feszültség a következő összefüggéssel számítható.

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{F_{\text{to}}}{b \cdot d_o} \cdot \frac{i+1}{i}} \cdot \sqrt{\frac{1.4}{\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}\right) \cdot \sin 2\alpha}} \quad [\text{N}/\text{mm}^2]$$

ahol: F_{to} - a felületre merőleges erő [N]

i - hajtásáttétel

E_1, E_2 - az érintkező anyagok rugalmassági modulusai [N/mm^2]

α - kapcsolószög [$^\circ$]

Az evolvens fogfelületeken keletkező csúszások nagyságára az érintkezéskor érintőlegesen működő v_t sebességek a mértékadók. A fogak C főponton kívüli helyeiben az érintőleges sebességek különböző nagyságúak, és különbségük adja meg a v_s csúszási sebességet. A súrlódási hőfejlődés, továbbá a kopás szempontjából ez a v_s sebesség a meghatározó.

A v_s csúszási sebesség:

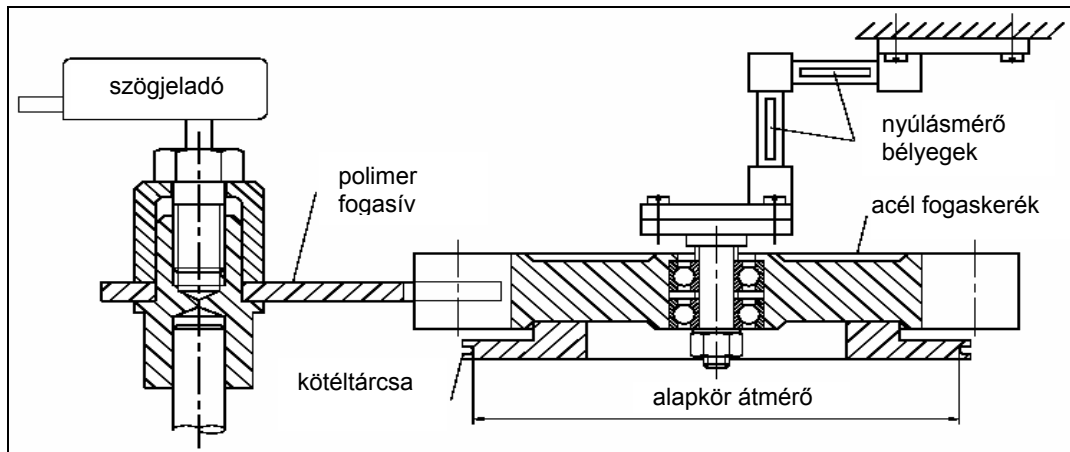
$$v_s = v_{t1} - v_{t2} \text{ vagy } v_s = s \cdot (\omega_1 + \omega_2)$$

ahol: s - a főponttól a kapcsolóvonalon mért távolság [mm]

ω_1, ω_2 - a fogaskerek szögsebességei [rad/s]

3. Berendezés

A fogkapcsolódási modellvizsgálatokhoz építettem egy berendezést, vázlata az *1. ábrán* látható. A motor egy csigahajtóművön keresztül forgatja a polimer fogasívet. Ehhez kapcsolódik az acél fogaskerék, amely a nyúlásmérőkkel ellátott befogófej tengelycsonkján csapágyazva van. A kapcsolódás során az acél fogaskerék terhelése a súlyterhelésből adódóan állandó nagyságú, amely a fogaskerek kapcsolóvonal mentén hat az alapkör átmérőjének megfelelő kötélcsigán keresztül. A polimer fogasív kapcsolóvonal menti fogkapcsolódás kezdeti és végpontjainak szöghelyzetei számításokkal pontosan meghatározhatók. Ezen helyzeteket két mikrokapcsolóval érzékelem, és a motor forgásirányát változtatva a két végállás közt forgatja a hajtó fogasívet. A szögjeladó a polimer fogasív tengelyén helyezkedik el.

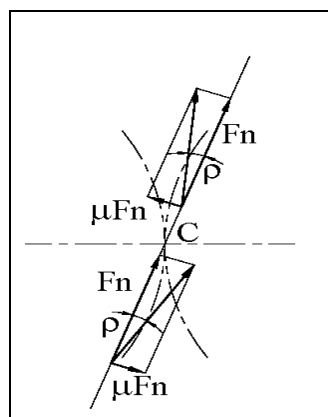


1. ábra A berendezés vázlata

4. Mért és számított erő értékei

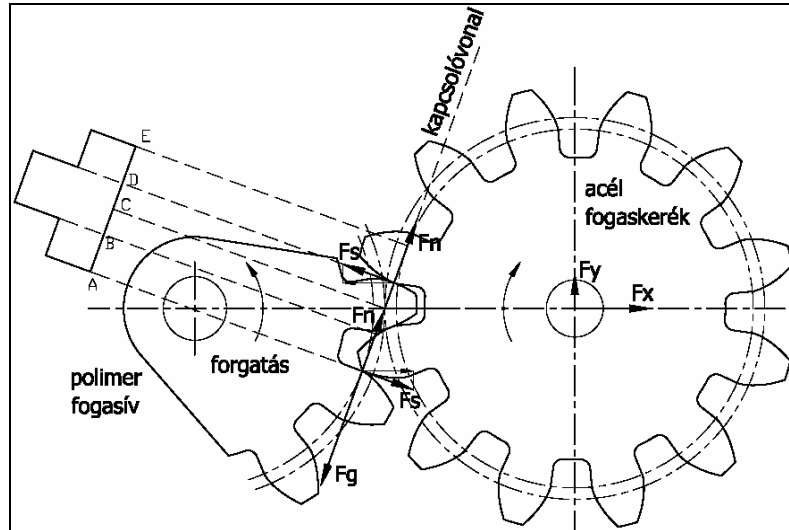
Fogkapcsolódás vizsgálat esetén az acél fogaskerék tengelyét terhelő erőket (F_x , F_y) mérem a fogkapcsolódás folyamán. A modellvizsgálat során a kapcsolóegyenes hatásvonalában helyezkedik el a terhelőerő (F_g), ezáltal az megegyezik az acél fogat terhelő normál erővel (F_n). Evolvens fogazat esetén az α kapcsolószög állandó, az F_n erő is állandó értékű. Mivel az F_n erő α szög alatt hajlik, emiatt olyan erőhatást is okoz, amely a tengelyeket egymástól eltávolítani igyekszik. Ennek nagysága: $F \cdot \tan \alpha$.

Amennyiben a súrlódás hatását figyelembe vesszük, akkor evolvens egyenes fogazat esetén a kapcsolóvonaltól a súrlódás félkúpszögének megfelelő ρ szöggel tér el a fogfelületre ható erő. A kapcsolódás első felében a hajtókerék a tiszta gördülés mellett mintegy belecsúszik a hajtott kerék fogárákába, a C főpont után pedig kicsúszik a fogárból. A C főpontban emiatt a súrlódás iránya és vele a fogfelületre ható erő iránya is hirtelen megváltozik (2. ábra), csupán a C főpontban esik egybe a kapcsolóvonallal, mivel itt a fogfelületek gyakorlatilag csúszásmentesen, tiszta gördüléssel érintkeznek egymással. A C főpontban a súrlódás miatt adódó hirtelen erőirányváltás rezgést okoz, egyrészt ez is okozza a fogaskerékpár zaját.



2. ábra A súrlódás hatása

A kapcsolódás folyamán a súrlódási erő nagysága folyamatosan változik. Ezt a modellvizsgálatoknál az egyes kapcsolódási szakaszokban különbözőképpen határoztam meg. A két fog kapcsolódási szakaszában (AB és DE szakaszok) a fogak normál irányú terhelése a teljes terhelés fele $F_n = F_g/2$ [N]. Mindkét érintkezési pontban ébred súrlódási erő F_s [N] (3. ábra), azok egymással ellentétes irányúak, és így egy fékező, csavaró nyomatékot idéznek elő. Azonban ezt a fékező, csavaró hatást a vizsgálati rendszer nem képes mérni.



3. ábra Két fogpár kapcsolódásnál fellépő erők

Az egy fog kapcsolódási szakaszt (BD szakasz) a főpont két részre osztja, ahol a súrlódási erő irányt vált (lásd fentebb). A fog normál irányú terhelése megegyezik a teljes terheléssel $F_n = F_g$ [N]. A súrlódási erő a mért tengelyerő nagyságát megváltoztatja (4. ábra). A főpontig a tengelyerő értékét növeli, majd utána csökkenti.

A súrlódási erő értékének számítása

BC kapcsolódási szakaszban:

$$F_x = F_n \cdot \sin \alpha + F_s \cdot \cos \alpha$$

ahol: F_x - a mért tengelyerő [N]

F_n - normál erő [N]

α - kapcsolószög [$^\circ$]

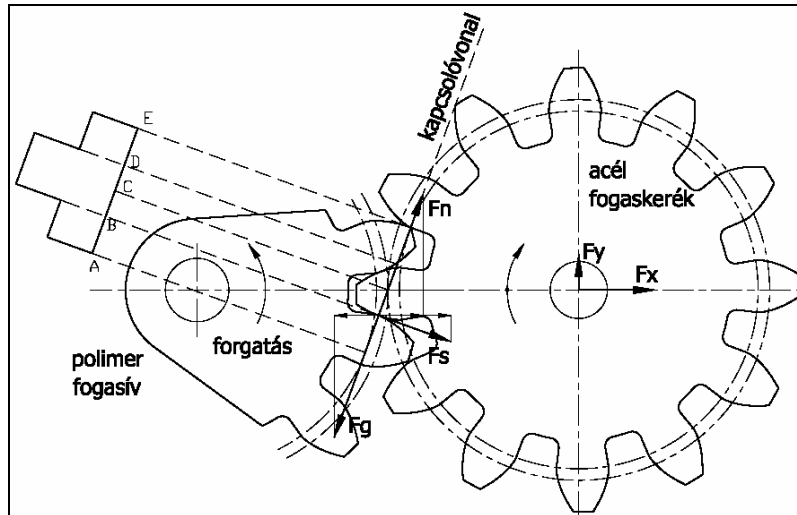
F_s - súrlódási erő [N]

$$F_s = \frac{F_x - F_n \cdot \sin \alpha}{\cos \alpha} \quad [\text{N}]$$

CD kapcsolódási szakaszban:

$$F_x = F_n \cdot \sin \alpha - F_s \cdot \cos \alpha$$

$$F_s = \frac{F_n \cdot \sin \alpha - F_x}{\cos \alpha} \quad [\text{N}]$$



4. ábra Egy fogpár kapcsolódásnál fellépő erők

A fogkapcsolódási rendszerben értelmeztem egy súrlódási tényezőt a kapcsolódó fogak közt, amelyet a súrlódási erő és a normál erő hányadosaként határoztam meg.

$$\mu = \frac{|F_s|}{F_n}$$

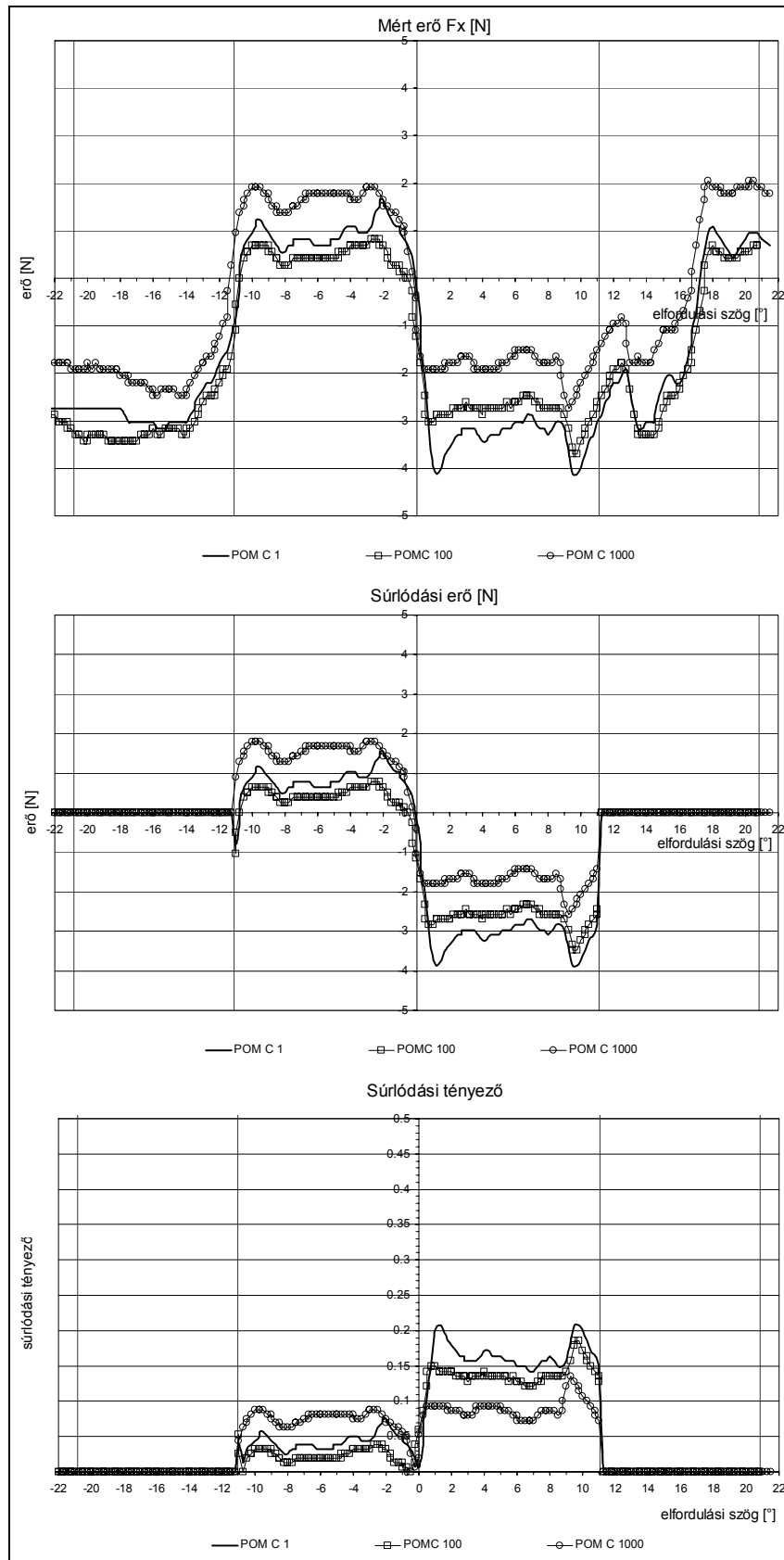
Az előzetes méréseket POM C polimer fogaskerékkel végeztem. A diagramok 1, 100, 1000 kapcsolódási ciklusban mért értékeket mutatják (5. ábra).

A felső diagramon a hajtott (fém) fogaskerék tengelyén mért radiális irányú erő értéke látható. Középen a számított súrlódási erő, majd alul a súrlódási tényező látható az „egy fogpár” kapcsolódási szakaszon. Az előzetes mérések igazolták a korábbi polimertribológiai vizsgálatok által sugallt tényt, hogy kenőanyag nélküli polimer/acél fogaskerekek súrlódása jelentősen változik az igénybevétel időtartamával, ami azt jelenti, hogy nem lehet állandó hatásfokkal számolni, tervezni a műanyag fogaskereket tartalmazó hajtóműveket.

Az előzetes méréseink azt is bebizonyították, hogy az eltérő polimerek más-más súrlódási veszteséggel, rendszerváltozással reagálnak.

Kutatási programom egyik célkitűzése, hogy ezt a jelenséget alaposabban megvizsgáljam, és feltérképezzem a különböző polimerek fogsúrlódási változását, mely segíti a későbbi műanyag fogaskerekes hajtások tervezését és anyagkiválasztását.

A bemutatásra került kutatási programot támogatja az OTKA T 42511 és a TÉT B-1/04 számú projekt.



5. ábra Vizsgálati diagramok ($F_g=2\text{kg}$; $\omega=0.093\text{rad/s}$)

Felhasznált irodalom

- [1] Antal – Fledrich – Kalácska – Kozma: Műszaki műanyagok gépészeti alapjai, Műszaki műanyagok gépészeti alapjai, Minerva-Sop Bt. Sopron, 1997
- [2] Benedict, G.H., and Kelley, B.W.: Instantaneous Coefficients of Gear Tooth Friction. ASLE Transactions, Vol. 4, No. 1, 1961. p. 59–70
- [3] Brian Rebbeschi, Fred B Oswald, Dennis P. Townsend: Measurement of Gear Tooth Dynamic Friction. NASA Technical memorandum 107279, Army Research Laboratory, 1996
- [4] Kozma Mihály: A fogaskerekek súrlódási vesztesége. Gép okt. – nov., 2004
- [5] www.quattroplast.hu
- [6] Yamaguchi Yukisaburo: Tribology of plastic materials. Amsterdam: Tribology series 16, Elsevier, 1990

MŰANYAG ÉS GUMI	
a Gépipari Tudományos Egyesület, a Magyar Kémikusok Egyesülete és a magyar műanyag- és gumiipari vállalatok havi műszaki folyóirata	
2006. augusztus: Műanyagipari trendek	2006. szeptember: Fröccsöntés
<p><i>Műanyag-feldolgozás Magyarországon 2005-ben</i></p> <p><i>Egészségesen fejlődik Közép- és Kelet-Európa műanyag piaca I. Áttekintés és Oroszország</i></p> <p><i>Kína műanyagipara</i></p> <p><i>α-olefin homo- és kopolimerek kristályosodási tulajdonságai</i></p> <p><i>Optimális fröccsöntés VIII. Égégátolt műanyagok</i></p> <p><i>Műanyagipari újdonságok</i></p> <p><i>Műanyagipari hírek</i></p> <p><i>Iparjogvédelmi hírek</i></p> <p><i>Zöld szemmel a nagyvilágban</i></p>	<p><i>A fröccsöntés helyzete Magyarországon 2005-ben</i></p> <p><i>Egészségesen fejlődik Közép- és Kelet-Európa piaca II. Románia és Bulgária műanyagipara</i></p> <p><i>Fröccsdarabok vetemedésének mérése</i></p> <p><i>α-olefin homo- és kopolimerek reológiai tulajdonságai</i></p> <p><i>Optimális fröccsöntés IX. A kopás okozta hibák csökkentése</i></p> <p><i>Műanyagipari hírek</i></p> <p><i>Iparjogvédelmi hírek</i></p> <p><i>Kiállítások, konferenciák</i></p> <p><i>Gumiipari hírek</i></p>
<p>Szerkesztőség: 1371 Budapest, Pf. 433. Telefon: +36 1 201-7818, 201-7580 Fax: +36 1 202-0252</p>	