

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



KISMÉRETŰ MŰANYAG FOGASKEREK SPECIÁLIS TERVEZÉSI KÉRDÉSEINEK KUTATÁSA

Tézisfüzet

Készítette:

MARADA IMRE

OKLEVELES GÉPÉSZMÉRNÖK

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPEK ÉS SZERKEZETEK TERVEZÉSE TÉMATERÜLET
GÉPEK ÉS ELEMEIK TERVEZÉSE TÉMACSOPORT

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ
VADÁSZNÉ PROF. DR. BOGNÁR GABRIELLA
EGYETEMI TANÁR

TÉMACSOPORT VEZETŐ
VADÁSZNÉ PROF. DR. BOGNÁR GABRIELLA
EGYETEMI TANÁR

TÉMAVEZETŐ
DR. BIHARI JÁNOS
EGYETEMI DOCENS

Miskolc
2026

Marada Imre

KISMÉRETŰ MŰANYAG FOGASKEREKEK SPECIÁLIS TERVEZÉSI
KÉRDÉSEINEK KUTATÁSA

Tézisfüzet

Miskolc
2026

1. BEVEZETÉS

1.1. A KISMÉRETŰ MŰANYAG FOGASKEREKEK

A kisméretű műanyag fogaskerekek alatt ebben a disszertációban az olyan evolvens profilú, egyenes fogú, külső fogazatú fogaskerekeket értek, melyeknek modulja nem nagyobb 0,5 mm-nél. Ezeknek a fogaskerekeknek az alapanyaga valamilyen műanyag, általában POM vagy PA [1].

Kisméretű műanyag fogaskerekkel szinte minden területen találkozhatunk. Legtöbbször nem teljesítményhajtásoknál használják őket, hanem valamilyen kinematikai művelet végrehajtására. A járműipar például a visszapillantó tükrök állítására vagy a légkondicionáló rendszerek terelőlemezeinek mozgatására alkalmazza őket [2]. De használják őket irodai gépekben, például nyomtatókban fejmozgatásra, különböző mérőeszközökben, pozicionáló hajtóművekben, vagy olyan alkalmazásokban is, mint például a játékipar mozgásokat megvalósító játékaik [3] [4].

A műanyag fogaskerekek megbízható kialakításához szükséges számításokhoz nem áll rendelkezésre nemzetközi szabvány, hanem csak régióként elfogadott, nemzeti szintű vagy egyes cégeken belüli irányelveket használnak [5]. Így lényegében minden nagyobb műanyag fogaskerékgyártónak megvan a maga számítási módszere és segédlete. Ez a helyzet nagy akadályt jelent a műanyag fogaskerék-ipar számára, mivel akadályozza a tervezési ismeretek és információk egyszerű cseréjét [6] [7] [8].

A nyugat-európai országokban a műanyag fogaskerekek egyetlen általánosan elfogadott irányelve a német VDI 2545 irányelv volt, amelyet 1996-ban visszavontak, mivel a melegedésre vonatkozó számítások és tapasztalatok elavulttá váltak. Csaknem 20 év után a VDI 2014-ben új irányelvet tett közzé, a VDI 2736 jelűt. Másrészt 2013-ban megjelent a japán JIS B 1759 szabvány a műanyag fogaskerekek hajlító terhelhetőségének kiszámítására [6] [9].

1.2. A KUTATÁSI CÉLKITŰZÉSEK

A nemzetközi szabvány hiánya és az egyes irányelvek hiányosságai vezettek arra, hogy ezzel a témakörrel behatóbban is foglalkozzak. A kutatással a célom az volt, hogy a nemzetközi szabvány hiánya okozta tervezési kérdések megválaszolásával foglalkozzak. Ezek közül azokat helyeztem előtérbe, amelyek a legnagyobb problémát jelenthetik, illetve amelyeket a rendelkezésemre álló idő és eszközök felhasználásával reálisan meg tudok oldani.

Elsőként a kisméretű műanyag fogaskerekeken megjelenő gyártási és szerelési problémákkal akartam foglalkozni. Bár a hajtóművek hibáinak vizsgálatára gyakran szokták alkalmazni az átfogatási nyomaték vizsgálatát, magával a hiba okával és kimutathatóságával nem szoktak foglalkozni. Ezért célomul tűztem ki, hogy az átfogatási nyomaték

jelleggörbájének vizsgálatával kimutassam nemcsak az egyes fogaskerekeken található hibákat, de azok fajtáját és nagyságát is. Mivel ez jelentős megtakarítást eredményezhetne a gyártási folyamatokban. Például egy fröccsöntési hibás fog felismerésekor azonnal ki lehetne vonni a problémás alkatrészeket a gyártásból, kevesebb lenne a selejt hajtómű, így nem veszne el annyi összeszerelésbe és ártalmatlanításba fektetett energia.

Az előző problémához egy olyan gyártási módszert kellett találnom, amivel a rendelkezésemre álló forrásokból, kis mennyiségben, megfelelő pontossággal tudok hiba nélküli, illetve általam a fogaskerék-geometrián elhelyezett hibákat tartalmazó fogaskerekeket gyártani. A kisméretű műanyag fogaskereket többnyire fröccsöntéssel hozzák létre. Azonban ez csak nagy gyártási volumenek esetén gazdaságos. Ezért céломul tűztem ki, hogy megvizsgáljam a 3D nyomtatási módszereket, hogy melyikkel lehetséges a rendelkezésemre álló technológiával és paraméterekkel a vizsgálatokhoz szükséges minőségű és mennyiségű fogaskerék gyártása.

A kisméretű műanyag fogaskerekeken lévő hibák kimutatása azért is szükséges, mert ezek befolyásolhatják a fogakon ébredő fogtőfeszültségeket és felületi Hertz-feszültségeket is. Ezeknek a feszültségeknek a túlzott megnövekedése a műanyag fogaskerekek leggyakoribb tönkremeneteli okai közé tartozik. Ezért végeselemes módszer segítségével akartam vizsgálni, hogy az egyes hibák milyen hatással vannak a fogaskerekeken ébredő feszültségekre.

Végezetül célom volt a kisméretű műanyag fogaskerekek melegedésével is foglalkozni. Kisméretű műanyag fogaskerekek esetén ugyanis a túlzott melegedés nemcsak a szilárdsági jellemzőkre van negatív hatással, hanem a foghézag eltűnésével is járhat, ami fogtöréshez vezethet. A műanyag fogaskerekek melegedésének számítására használt képleteket normál méretű fogaskerekekre hozták létre. Ezért akartam mérések segítségével megvizsgálni, hogy a kis modulok esetén a képletek mutatnak-e eltérést a mért értékekhez képest.

2. A KUTATÁSI EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA

2.1. A 3D NYOMTATOTT KISMÉRETŰ MŰANYAG FOGASKEREKEK PONTOSSÁGA

Az átforgatási nyomaték vizsgálatához egy olyan gyártási módszert kellett találnom, amivel a rendelkezésemre álló forrásokból, kis mennyiségben, megfelelő pontossággal tudok hiba nélküli, illetve általam a fogaskerék-geometrián elhelyezett hibákat tartalmazó fogaskerekeket gyártani. Ezért az általam elérhető 3D nyomtatási technológiákkal gyártott fogaskerekek pontosságát vizsgáltam. Háromféle technológiával végeztem méréseket. Ezek az FDM, az SLA és az SLS voltak.

A vizsgálatokat optikai mikroszkóppal végeztem el és speciális mérősablonokat terveztem hozzájuk és gyártottam le SLA nyomtatással. A mikroszkóp felhasználásával öt paramétert vizsgáltam. Ezek a fog alakja, a fogvastagság, az osztás, a fogmagasság és a fejmagasság voltak. A fog alakját egy-egy fogon, a többi paraméter esetén méréseket 40 darab, véletlenül kiválasztott fogon végeztem el.

A fogaskerékgeometriát 0,5 mm modullal generáltam a KISSSoft szoftverével. A vizsgálatokhoz kétféle fogszámot választottam, ezek $z=30$ és $z=50$ voltak. A nyomtatott fogaskerekeket a rendelkezésemre álló fröccsöntött fogaskerekekkel hasonlítottam össze, mivel olyan fogaskerekekkel akartam a vizsgálatokat elvégezni, amelyeknek a pontossága legalább ezeknek a fröccsöntött kereknek a pontosságát elérte. A fröccsöntött kerek modulja és fogszáma megegyezett a nyomtatáshoz generált fogaskerekekével.

A fog profiljának összehasonlítása a kiindulási geometria fogprofiljával kimutatta, hogy az SLA technológia kis eltéréssel, jó közelítéssel hasonlít az elvárt profilhoz. Az FDM technológia ezzel szemben jelentősen különbözött a szabványos profiltól. Az SLS eljárással gyártott fogaskerék profilja a kettő közötti pontosságot ért el. Fogvastagság tekintetében az SLA eljárásnál 5,8% volt a legnagyobb eltérés, az FDM-nél és az SLS-nél már 10% feletti. Az osztóköri osztásnál az SLA 1,3%-os pontosságú volt, a másik két eljárás ezzel szemben 4% feletti hibát mutatott. Fogmagasság tekintetében az SLA legnagyobb eltérése 2,6% volt, az SLS eljárásé 10% feletti, az FDM technológiáé 20% feletti. A fejmagasságok esetén az eltérés μm -ben hasonló nagyságú volt, mint a fogmagasságé.

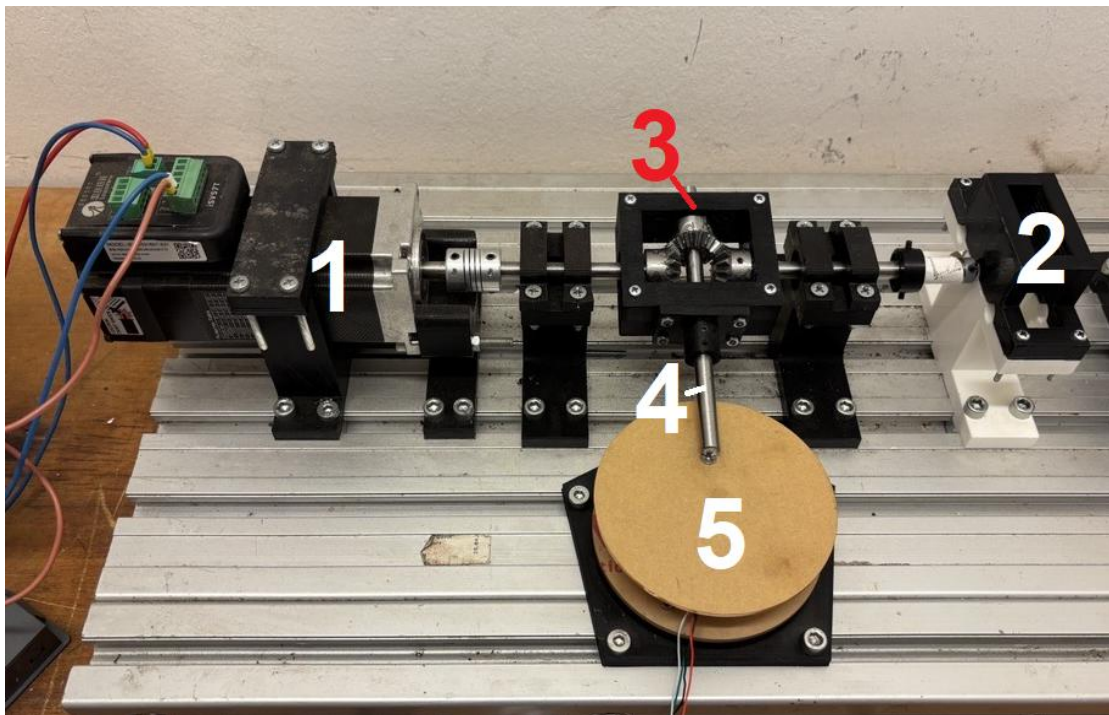
2.2. AZ ÁTFORGATÁSI NYOMATÉK MÉRÉSE

Az átforgatási nyomaték alatt azt a nyomatékot értjük, ami ahhoz szükséges, hogy a hajtóművet az egyik tengelyénél terhelés nélkül forgatva legalább egy teljes fordulatnyival átforgassuk.

Mivel az átforgatási nyomaték arányos a hajtómű belső súrlódásával, a mérése ellenőrzési módszerként régóta alkalmazott eljárás, különösen nagyméretű, kúpkeres hajtóművek esetén. A módszert kisméretű hajtóművek esetén is szokták alkalmazni, mert az ilyen

hajtóműveknél az elvárt gyártási költségek és a gyártott tömeg jellemzően nem teszik lehetővé alaposabb minőségellenőrzési eljárások alkalmazását. Azonban jellemzően csak a hajtómű maximális átfogatási nyomatékát hasonlítják össze a megfelelőséghez tartozó legnagyobb értékkel. Ha átlépi ezt az értéket, akkor a hajtóművet nem megfelelőnek ítélik, a hiba okát és hatását nem vizsgálják [10].

A célom az volt, hogy a nyomatékgörbe vizsgálatából megállapítható legyen nem csak az, hogy a hajtómű hibás fogaskerekeket tartalmaz, hanem a hiba okára is lehessen következtetéseket levonni. Mivel csak statikus nyomatékmérő állt a rendelkezésemre és a forgó nyomatékmérők ára a statikusokhoz képest sokkal nagyobb, ezért egy differenciálmű elvén terveztem egy dinamikus nyomatékmérőt.



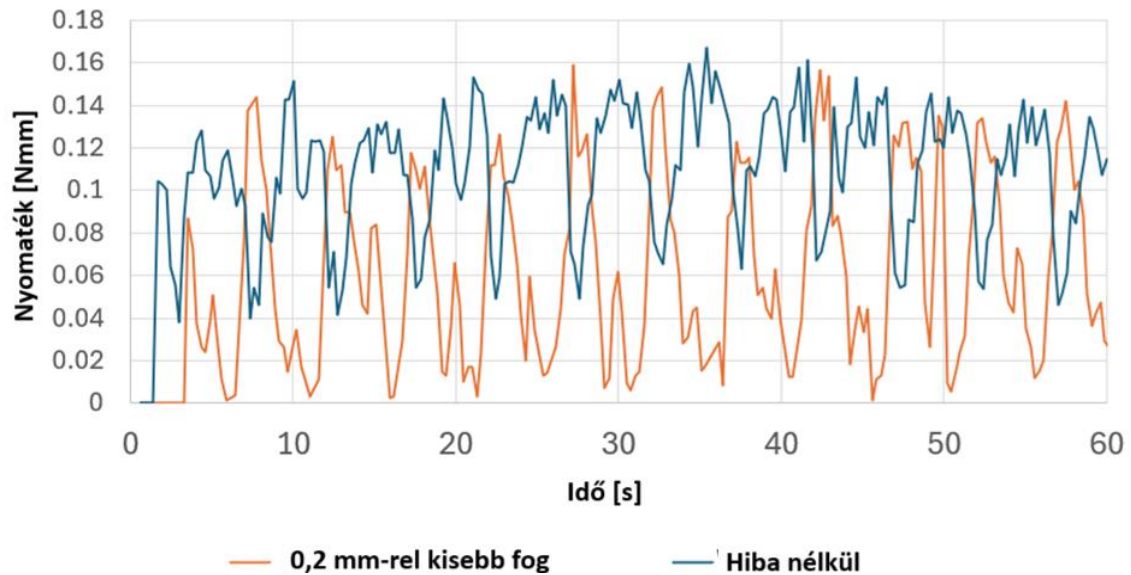
1. ábra: A dinamikus nyomatékmérő berendezés (1: meghajtó motor, 2: mérendő fogaskerekeket tartalmazó hajtómű, 3: kúpkerékes egység, 4: mérőtengely, 5: mérőszenzor)

Annak megerősítésére, hogy a 3D nyomtatási technológiák közül az SLA megfelelő ezekhez a vizsgálatokhoz, átfogatási nyomaték vizsgálatokat is végeztem mindhárom nyomtatási eljárásra, illetve a fröccsöntött kerekre is. Az átfogatási nyomaték eredményeiből, illetve a mikroszkópos vizsgálatok eredményeiből egyértelműen látszik, hogy a sztereolitográfia messze a legpontosabb 3D nyomtatási technológia a három közül. Mivel a technológiák közül csak az SLA nyomtatás felel meg a további vizsgálatokhoz elvárt minőséghez, ezért az átfogatási nyomaték mérésével folytatott további vizsgálataimhoz ezzel a technológiával gyártott fogaskerekeket használtam.

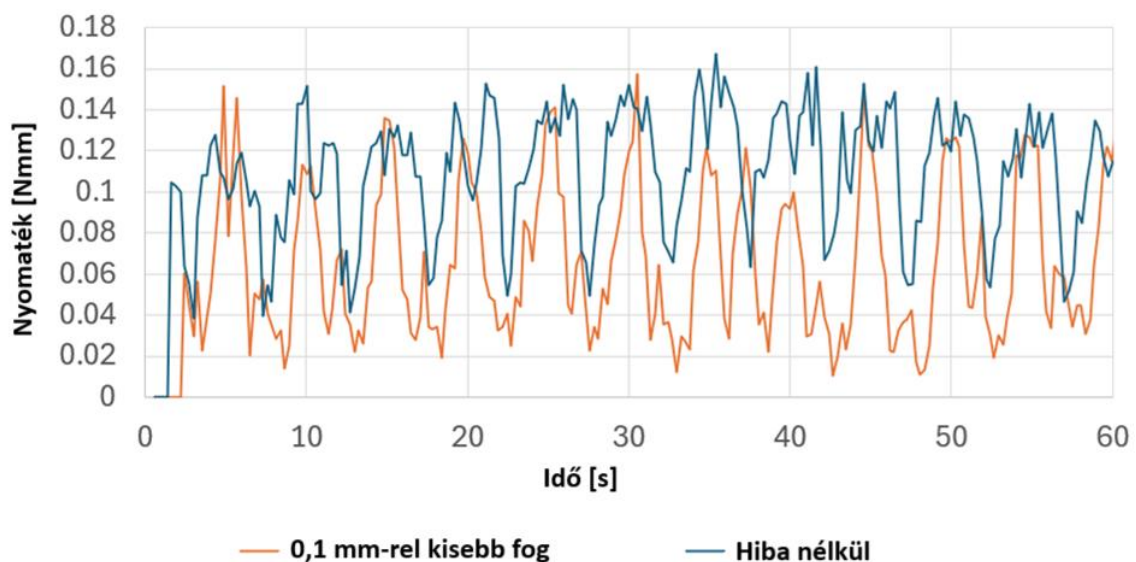
A hibák közül elsőként a kisméretű műanyag fogaskerekek fogvastagsághibáival foglalkoztam. Négyféle esetet vizsgáltam. A módosított fog az első esetben 0,2 mm-rel

kisebb, a másodikban 0,1 mm-rel kisebb, a harmadikban 0,1 mm-rel nagyobb, a negyedikben pedig 0,2 mm-rel nagyobb volt a szabványos értéktől.

Csökkentett fogvastagság esetén a jól láthatóak azok a ciklikusan ismétlődő helyek, ahol az átforgatási nyomaték értéke jelentősen lecsökken a referenciaértékhez képest. Minél kisebb volt a hibás fog vastagsága, annál kisebb értéket vett fel a nyomaték ezeken a helyeken. Az is látható, hogy ezeket a helyeket leszámítva az összes többi érték a hiba nélküli fogaskerékpárokhoz tartozó értékeket veszi fel.

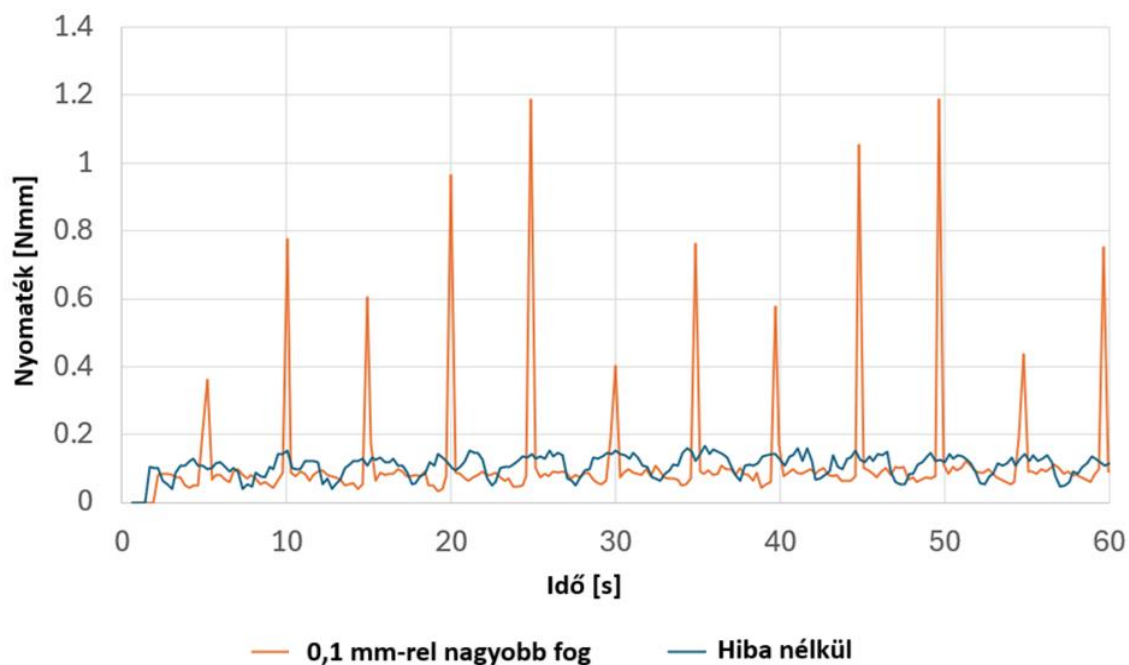


2. ábra: Az átforgatási nyomaték görbéi $z=30$ esetén, ha az egyik fogaskerék egyik foga 0,2 mm-rel kisebb a többinél

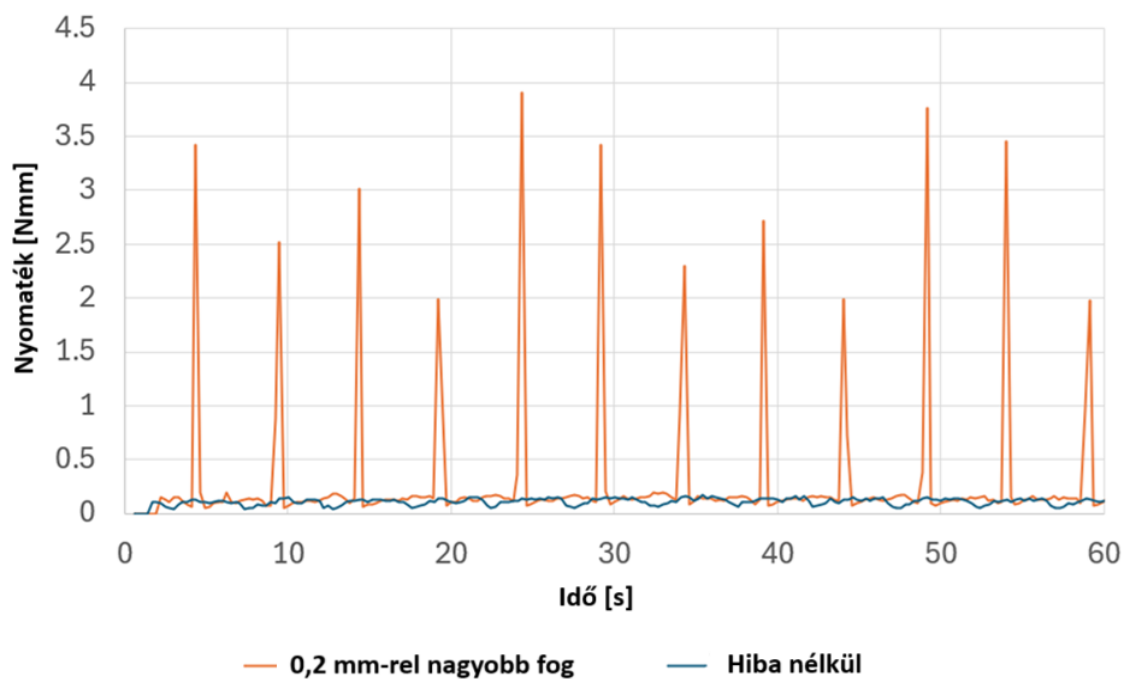


3. ábra: Az átforgatási nyomaték görbéi $z=30$ esetén, ha az egyik fogaskerék egyik foga 0,1 mm-rel kisebb a többinél

Növelt fogvastagság esetén a diagrammokon látható, mikor a hibás fog lép kapcsolódásba, a nyomaték jelentősen megnő, egyébként viszont a nyomaték értéke a hiba nélküli eset értékeit veszi fel. Minél nagyobb volt a hibás fog vastagsága, annál nagyobb értéket vett fel a nyomaték a ciklikusan megjelenő helyeken.

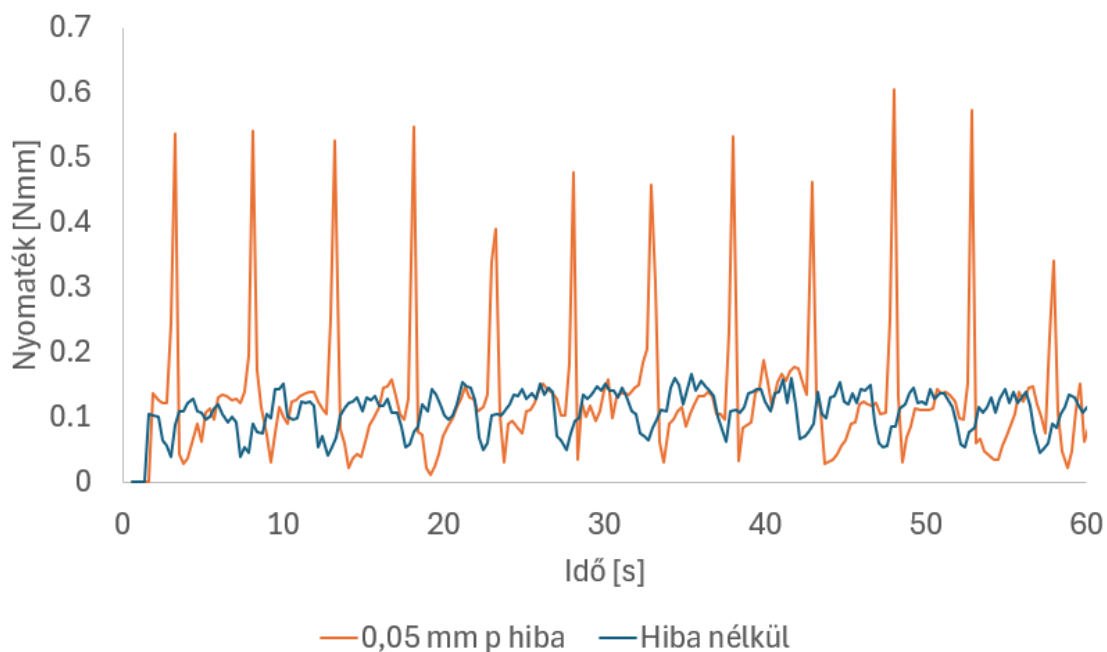


4. ábra: Az átforgatási nyomaték görbéi $z=30$ esetén, ha az egyik fogaskerék egyik foga 0,1 mm-rel nagyobb a többinél

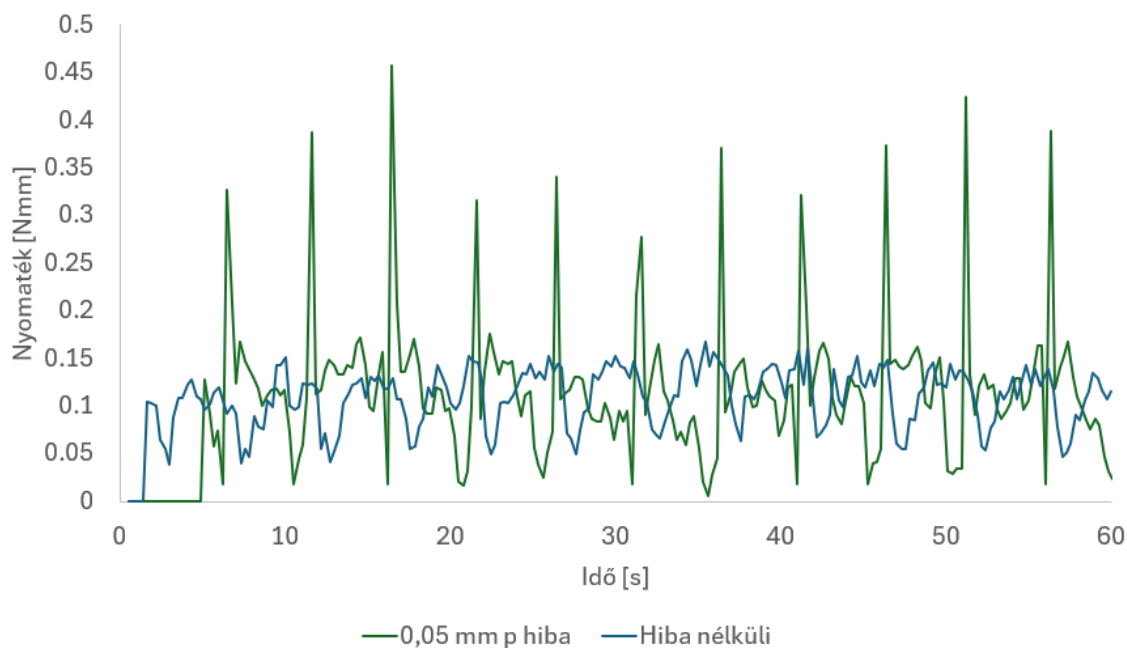


5. ábra: Az átforgatási nyomaték görbéi $z=30$ esetén, ha az egyik fogaskerék egyik foga 0,2 mm-rel nagyobb a többinél

A következő ábrákban vizsgált hiba a kisméretű műanyag fogaskerekek osztóköri osztásának hibája volt. Ebben az esetben a Solid Edge CAD tervezőszoftverrel az osztáshibát úgy hoztam létre, hogy a fogaskerék egyik fogát elforgattam a fogaskerék tengelye körül. A hibás fogat úgy forgattam el, hogy az osztás egyik esetben 0,05, másik esetben 0,1 mm-rel változzon a szabványoshoz képest. Osztáshibánál, azt tapasztaltam, hogy amikor a hibás fog lép kapcsolatba, a nyomaték jelentősen megnő, majd hirtelen lecsökken, vagy fordítva. Ez azzal magyarázható, hogy a csökkentett osztású résznél a foghézag is lecsökken a szabványoshoz képest, míg a fog másik oldalán a foghézag a szabványos érték fölé kerül.

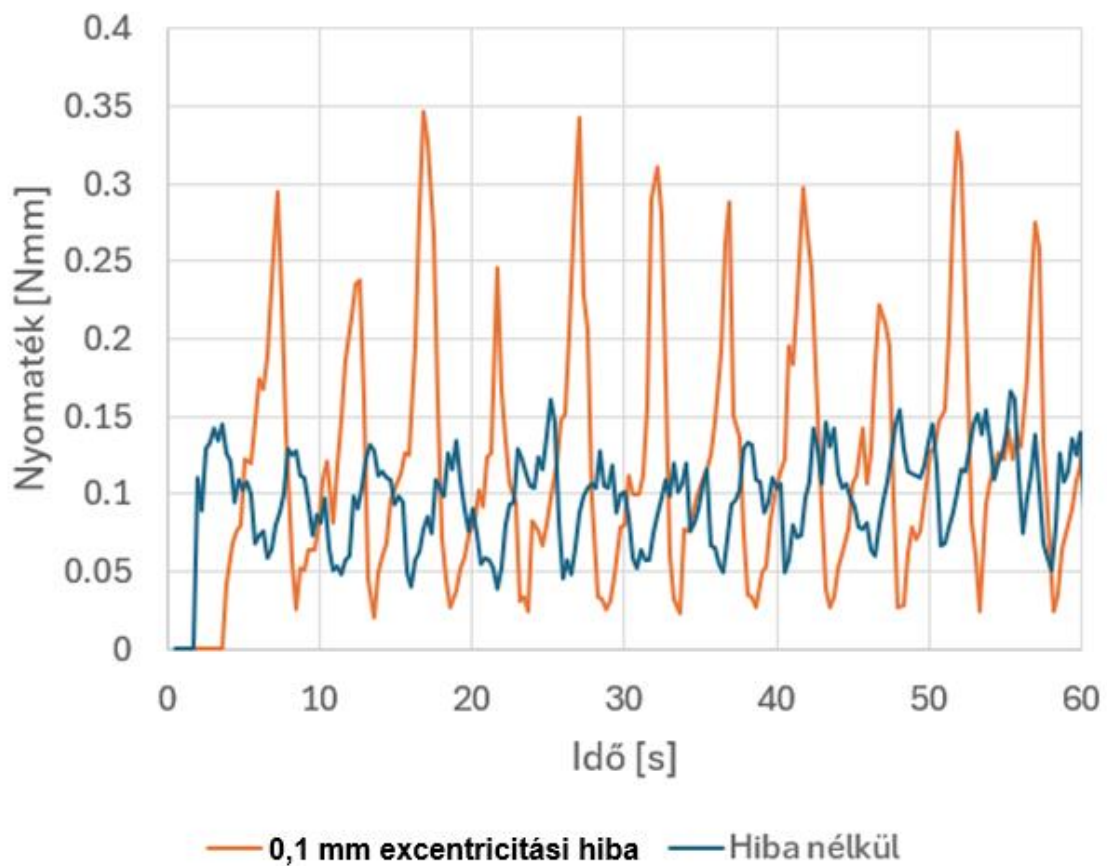


6. ábra: A nyomatékgörbe 0,05 mm osztáshiba esetén az I. forgásiránynál

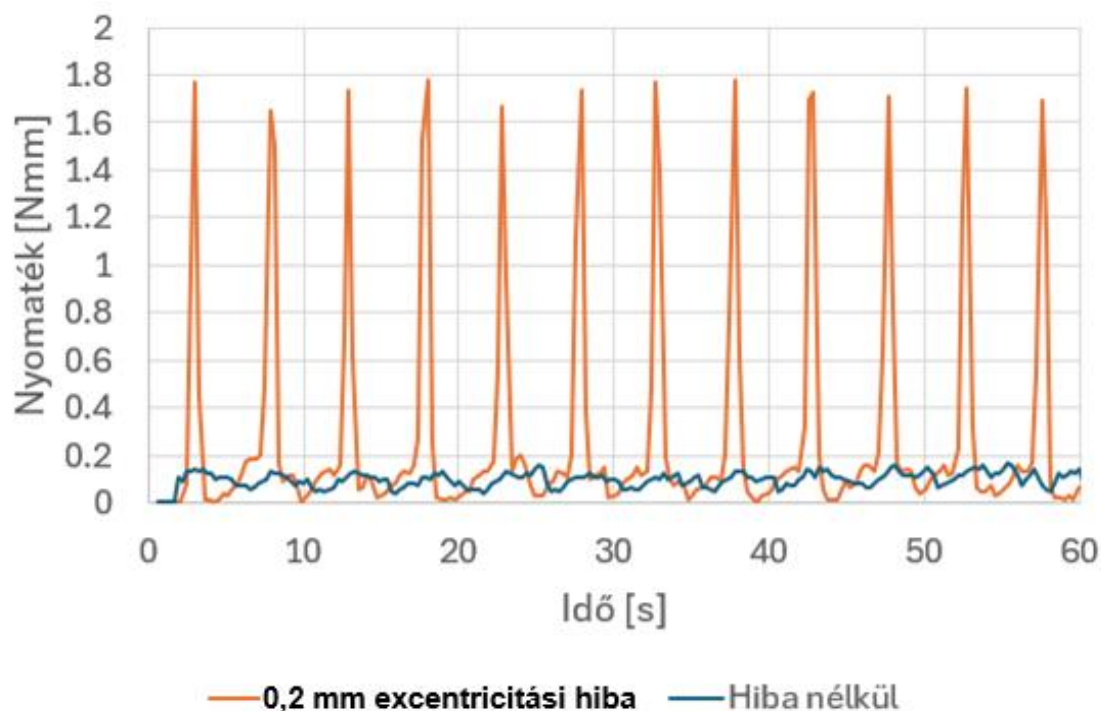


7. ábra: A nyomatékgörbe 0,05 mm osztáshiba esetén a II. forgásiránynál

Végezetül excentricitási hibákat vizsgáltam. Az excentricitás hibáinak vizsgálatához olyan fogaskerekeket készítettem, amiknek a tengelye 0,1, illetve 0,2 mm excentricitással el volt mozgatva a szabványoshoz képest. A diagrammokon az látszik, hogy a nyomaték folyamatosan növekszik egy ciklikusan megjelenő maximum pontig, majd csökken egy szintén ciklikusan megjelenő minimum pontig. Ez azzal magyarázható, hogy a vizsgálat során a két fogaskerék fogai folyamatosan közelednek és távolodnak egymáshoz képest. Közelítéskor a fogak közötti foghézag lecsökken, így a nyomaték megnő, míg a távolításkor a nyomaték a foghézag növekedése miatt lecsökken. Azokban a pontokban, ahol a fogaskerekek a szabványos távolságban kapcsolódnak, ott nyomaték értéke a hiba nélküli fogaskerékpárokénál mért értéket veszi fel.



8. ábra: Az excentricitás 0,1 mm-es hibájának hatása $z=30$ esetén



9. ábra: Az excentricitás 0,2 mm-es hibájának hatása $z=30$ esetén

Mindent összevetve elmondható, hogy az átfogatási nyomaték mérésnek módszerével a vizsgált hibák hatása kimutatható.

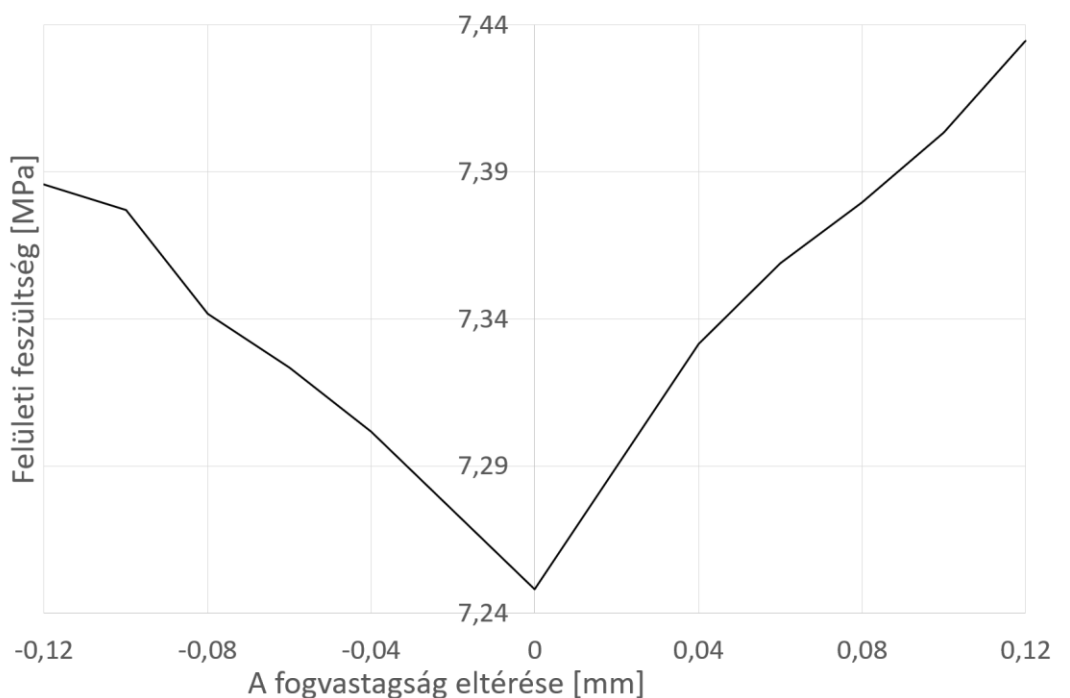
2.3. A HIBÁK HATÁSA A FOGAKON ÉBREDŐ FESZÜLTSEGEKRE

A hibák nem csak az átfogatási nyomatéokra lehetnek hatással, hanem kihathatnak a kapcsolódáskor a fogakon ébredő feszültségekre is. Ezért a felületi- és a fogtőfeszültségekre gyakorolt hatásokat vizsgáltam végesselemes módszer segítségével.

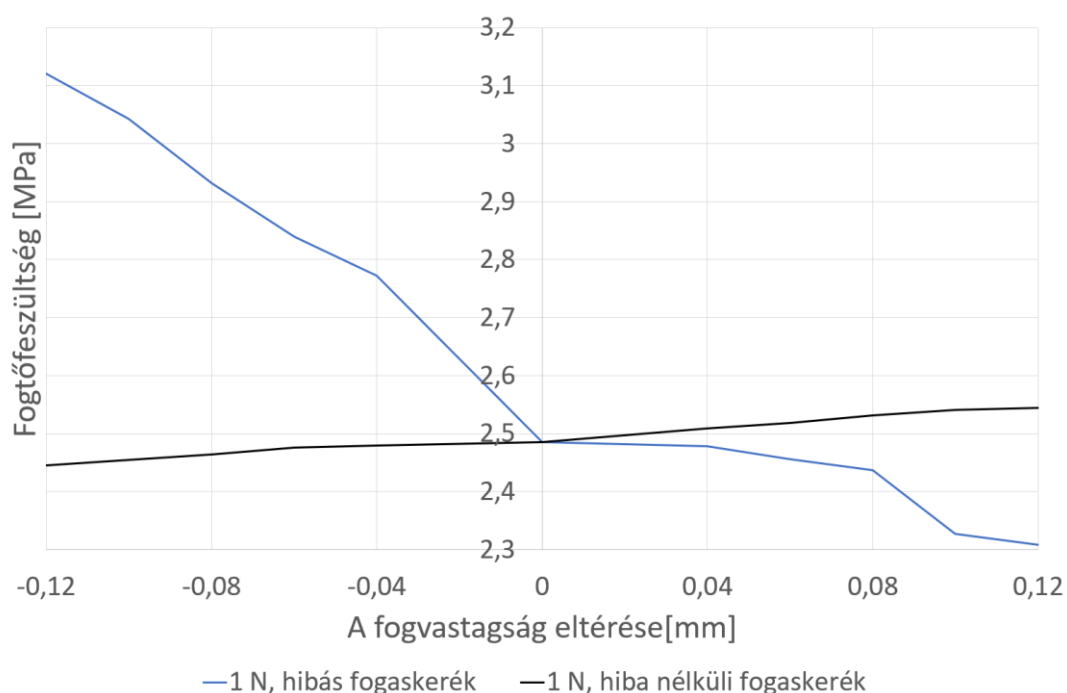
A végesselemes analízishez az Ansys nevű szoftvert használtam. A szoftverben felépített modell két fogaskerékből állt. Mindkét fogaskerék modulja 0,5 mm, fogszélessége 2,5 mm, fogszáma pedig 30 volt. A modell felállításának egyik legfontosabb része a végesselemes háló elemméretének meghatározása volt. Ennek érdekében hiba nélküli fogaskerékpárok esetére is elvégeztem szimulációkat. Ahhoz, hogy a szimulációval kapott eredményeket validálhassam, össze kellett hasonlítanom a szakirodalomban szereplő feszültség számító képletekkel. A feszültségek számítását a VDI 2736 irányelv alapján végeztem el. A durvább hálóméretekkkel indultam el és addig finomítottam az elemek nagyságát, amíg megfelelő pontossággal nem kaptam meg a képletekből kapott értékeket. Egy elemméretet csak akkor fogadtam el, ha mindhárom terhelés esetén kisebb az eltérés, mint 0,1 %. A feltételeknek a 4 μm nagyságú háló felelt meg.

A méreteltérések hatásának szemléltetésére fogvastagsághibákat használtam. Ehhez olyan eseteket vizsgáltam, amikor a két érintkező fogaskerék egyikének fogvastagsága kisebb vagy nagyobb volt a szabványosnál.

Az eredmények azt mutatták, hogy minél jobban eltér a fogvastagság értéke a szabványostól, akár negatív, akár pozitív az eltérés, annál jobban nő a felületi feszültség a kiindulási értékhez képest. A fogtőfeszültségek esetén látható, hogy minél kisebb a hibás fog vastagsága, annál nagyobb lesz rajta a fogtőfeszültség, de minél nagyobb lesz a fog vastagsága, annál kisebb lesz a fogtőfeszültség a hibás fogon. Ezzel szemben minél nagyobb a hibátlan foghoz kapcsolódó fog, annál nagyobb a fogtőfeszültség a hiba nélküli fogaskeréken.



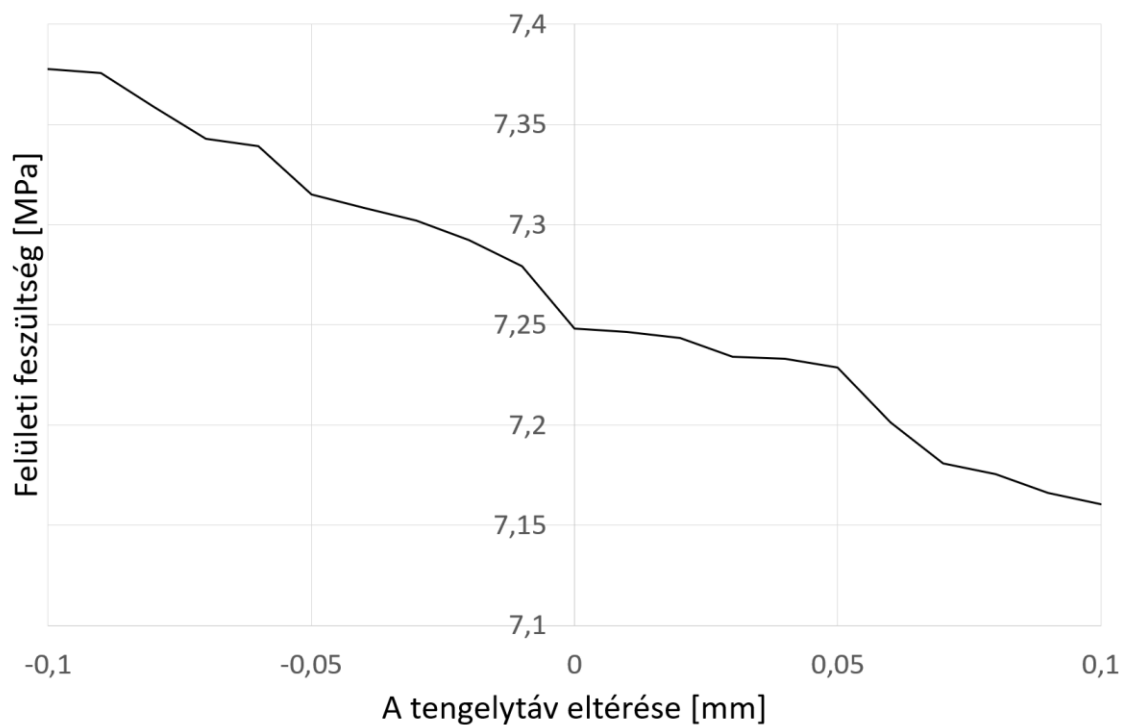
10. ábra: A fogvastagsághibák hatása a felületi feszültségekre



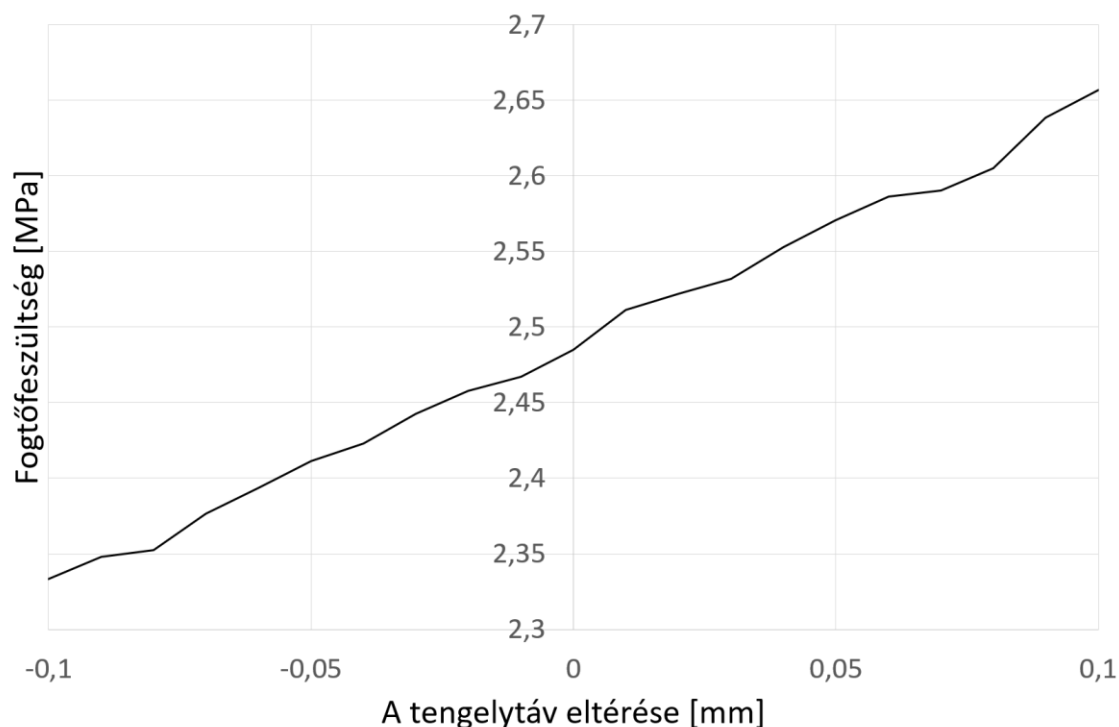
11. ábra: A fogvastagsághibák hatása a fogtőfeszültségekre

Az alakhibáknál az FDM technológiával gyártott fogaskerek esetét vizsgáltam. Ezért CAD szoftver segítségével újraalkottam a PLA-ból készült fogaskerék fogait. Ezekkel két esetet vizsgáltam. Az elsőnél csak a profilt alkottam újra, a fogaknál megjelenő üregeket nem. A másikonál a profil mellett az üregeket is létrehoztam. Mindkét esetben mindkét érintkező fogaskerék ugyanazt a hibát tartalmazta. Az eredményekből az látszott, hogy már az üreg nélküli esetben is jelentősen megnőtt a feszültség a hiba nélküli esethez képest. Azonban a második esetben, mikor az üregek is elhelyezésre kerültek a geometrián, a feszültségértékek kis mértékben még tovább nőttek.

A helyzethibák közül a fogaskerek tengelytávjának hibáját választottam. Ezekben a vizsgálatokban a fogaskerek közötti tengelytávot úgy változtattam, hogy a két fogaskerék a szabványos tengelytávhoz képest közelebb vagy távolabb került egymástól. A fogaskerek geometriáját ezekhez a vizsgálatokhoz nem változtattam meg. Az eredmények azt mutatták, hogy a tengelytáv csökkenésével nő a felületi feszültség, és a tengelytáv növekedésével pedig csökken az érintkezési felületen ébredő feszültség. A fogtőfeszültségnél az ellentétes folyamat játszódik le, mint a felületi feszültségnél. Ahogy nő a tengelytávolság, úgy nő a távolság a fogtő és fogra ható tangenciális erő között, és így nő a fogtőfeszültség is. És ahogy a tengelytáv csökken, úgy csökken a fogtőfeszültség is.



12. ábra: A tengelytáv hibáinak hatása a felületi feszültségekre



13. ábra: A tengelytáv hibáinak hatása a fogtőfeszültségekre

2.4. A KISMÉRETŰ MŰANYAG FOGASKEREKEK MELEGEDÉSÉNEK VIZSGÁLATA

A melegedés méréséhez öt, egymástól független mérést végeztem el és azokat a normál méretű műanyag fogaskerekek melegedésének számítására használt képletekkel kapott eredményekkel hasonlítottam össze. A mérésekhez átforgatási nyomaték méréséhez is alkalmazott berendezést használtam. A különbség annyi volt, hogy a vizsgált fogaskerekre terhelést is adtam egy általam tervezett terhelőegységgel, amely egy folyadékba merülő vízkerékből állt. A fogaskerekek melegedésének méréshez egy Testo 872 hőkamerát használtam, mivel a VDI 2736 képletének meghatározásához is hőkamerával végeztek méréseket. Minden mérés esetén két $m=0,5$ mm modullal rendelkező fogaskereket mértem. A hajtott oldali fogaskerek fogszáma 30, a másiké 50 volt. A fogaskerekek fogszélessége 3 mm volt, anyaguk POM.

A mérések azt mutatták, hogy a mért értékek maximuma minden mérésnél jelentősen meghaladta a képletekből számított mennyiséget. A képleteknek 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. Emellett ilyen kis méretek esetén a melegedés okozta hőtágulás a foghézag eltűnéséhez és ezáltal a fog töréséhez vezethet. Ezért nem mindegy, hogy mi az a legnagyobb hőmérséklet, amire működés közben a fogaskerekek felmelegednek. Ezért egy új képlet meghatározása lenne javasolt. Erre sajnos jelenleg nem állnak rendelkezésemre megfelelő eszközök.

Azonban arra a tartományra, amelyre a méréseket elvégeztem, módosítottam a VDI 2736 szerinti összefüggést, melyet az (1) egyenlet mutat be. Ezzel a képlettel 0,8619 korrelációval határozható meg a melegedés maximuma a $\vartheta_k=21,3\dots 25,1$ °C, $n_1=273,73\dots 600$ 1/min és $F_t=0,0413\dots 0,2615$ N tartomány, illetve $m=0,5$ mm, $z_1=30$, $z_2=50$ és $b=3$ mm paraméterek esetén.

$$\vartheta_{1,2} = \vartheta_k + \left[H_v \cdot P \cdot \mu \cdot \left(\frac{k_\vartheta}{b \cdot z \cdot (v \cdot m)^{\frac{3}{4}}} + \frac{R_{\lambda,G}}{A_G} \right) \cdot ED^{0,64} \right] \cdot \left[\left(\frac{\vartheta_k}{21} \right)^3 \cdot (105,89 \cdot P^2 - 53,754 \cdot P + 6,8883) \right] \quad (1)$$

3. AZ EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

A kisméretű műanyag fogaskerekek átforgatási nyomatékának vizsgálatához olyan fogaskerekre volt szükségem, amelyekben célzottan el tudtam helyezni hibákat, majd megfelelő pontossággal a rendelkezésemre álló eszközökből és forrásokból kis darabszámban gazdaságosan le tudtam gyártani. Ehhez összehasonlítottam a rendelkezésre álló, hiba nélküli fröccsöntött fogaskereket a rendelkezésemre álló 3D nyomtatási technológiákkal és a rendelkezésemre álló paraméterekkel nyomtatott fogaskerekkel. A fog profiljának összehasonlítása a kiindulási geometria fogprofiljával kimutatta, hogy az SLA technológia kis eltéréssel, jó közelítéssel hasonlít az elvárt profilhoz. Az FDM technológia ezzel szemben jelentősen különbözött a szabványos profiltól. Az SLS eljárással gyártott fogaskerék profilja a kettő közötti pontosságot ért el. Fogvastagság tekintetében az SLA eljárásnál 5,8% volt a legnagyobb eltérés, az FDM-nél és az SLS-nél már jelentősen több, mint 10%. Az osztóköri osztásnál az SLA 1,3%-os pontosságú volt, a másik két eljárás ezzel szemben 4% feletti hibát mutatott. Fogmagasság tekintetében az SLA legnagyobb eltérése 2,6% volt, az SLS eljárásé 10% feletti, az FDM technológiáé 20% feletti. A fejmagasságok esetén az eltérés μ m-ben hasonló nagyságú volt, mint a fogmagasságé.

Az átforgatási nyomaték jelleggörbéjének segítségével vizsgáltam a kisméretű műanyag fogaskerekek hibáinak kimutathatóságát. Terveztem egy nyomatékmérésre alkalmas berendezést. A berendezéssel vizsgáltam a fogvastagság hibáit, mint méretbeli eltérést. Kimutattam, hogy ezzel a módszerrel kimutatható a fogvastagsághibák jelenléte és nagysága is. A gyártás során megjelenő helyzetbeli eltérések közül az osztóköri osztás hibáit vizsgáltam a berendezéssel. Kimutattam, hogy a módszer az ilyen típusú hibák kimutatására is alkalmas. Szereléskor megjelenő helyzetbeli hibaként az excentricitási hibák hatását vizsgáltam. Kimutattam, hogy a módszerrel az ilyen típusú hibák is kimutathatóak. Azt is kimutattam, hogy az eddig felsorolt hibák nem csak felismerhetőek a jelleggörbéken, de el is különíthetőek egymástól. Emellett az egyes 3D nyomtatott fogaskerekek átforgatási nyomatékainak jelleggörbéit is összehasonlítottam, mely alakbeli eltérésnek tekinthető. A jelleggörbék is ugyanazt a pontossági sorrendet mutatták, mint a mikroszkópos vizsgálatok. Az eredmények alapján két tézist határoztam meg.

Az egyes hibák hatásait a fogakon ébredő fogtőfeszültségek és felületi Hertz-feszültségek értékeire végelemes analízisekkel vizsgáltam. A három lehetséges eltérési típusból választottam egy-egy hibát. A méreteltérések hatásának vizsgálatára a fogvastagsághibákat használtam. Kimutattam, hogy a felületi feszültség annál nagyobb, minél nagyobb a fogvastagság eltérése bármelyik irányban a szabványoshoz képest. A fogtőfeszültség értéke a hibás fogon annál nagyobb, minél kisebb ennek a fognak a vastagsága. Ezzel ellentétesen a nem hibás fog fogtőfeszültsége annál nagyobb, minél vastagabb a vele érintkező fog. A fog alakhibáinak vizsgálatára az FDM technológiával nyomtatott fogaskereket használtam. Az eredmények kimutatták, hogy mind a fogtőfeszültség, mint a felületi feszültség jelentősen

megnő alakhibás fogak érintkezésekor. A helyzethibák vizsgálatára a tengelytáv hibáit használtam. Az eredmények megmutatták, hogy minél közelebb kerülnek egymáshoz a fogaskerekek a szabványoshoz képest, annál nagyobb lesz a Hertz-feszültség az érintkezési helyen. A fogtőfeszültség ezzel szemben annál nagyobb, minél messzebb kerülnek egymástól a fogaskerekek.

Kidolgoztam a terhelés alatt működő kisméretű műanyag fogaskerekek hőmérsékletének és terhelésének mérésére alkalmas mérőberendezést az átforgatási nyomaték mérésére alkalmas rendszerem továbbfejlesztésével. Összehasonlítottam az ismert hőmérsékletszámítási képletek eredményeit mérési eredményeimmel, melyből azt a következtetést vontam le, hogy a képletek kisebb hőmérsékletet adnak, mint a mérési eredmények. Indokoltá válik új számítási képlet megalkotása vagy az ismeretek pontosítása. A mérési tartományra meghatároztam egy új képletet.

4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK - TÉZISEK

T1. A kisméretű műanyag fogaskerekek átforgatási nyomatékának vizsgálatához a 3D nyomtatási eljárások közül a sztereolitográfiával (SLA) Phrozen Mini 8k S nyomtató esetén, 0,05 mm rétegvastagság és 4 s megvilágítási idő mellett, Phrozen Rock Black Stiff alapanyag használatával a vizsgálatokhoz megfelelő pontosságú kisméretű műanyag fogaskerekeket lehet gyártani.

Kapcsolódó publikáció: S1, S2, S3, S4

T2. Az átforgatási nyomaték jelleggörbéjének vizsgálatával számos esetben egyértelműen kimutatható a kisméretű műanyag fogaskerekek méret-, alak- és helyzethibáinak jelenléte, típusa és nagysága.

Kapcsolódó publikáció: S5, S6, S7

T3. A kisméretű műanyag fogaskerekek hibái hatással vannak az átforgatási nyomaték jelleggörbéjére. Fogvastagsághibák esetén, ha a szabványosnál nagyobb fog van kapcsolatban, akkor az átforgatási nyomaték értéke ciklikusan a szabványos mérethez tartozó érték fölé nő, ha a szabványosnál kisebb fog van a kapcsolatban, a nyomaték értéke ciklikusan a szabványos mérethez tartozó érték alá csökken. Osztáshibák esetén az átforgatási nyomaték forgásiránytól függően ciklikusan a szabványos osztáshoz tartozó értékek fölé majd alá csökken vagy fordítva. Excentricitási hibák esetén, minél közelebb vannak egymáshoz a fogak, annál nagyobb az átforgatási nyomaték és minél távolabb, annál kisebb.

Kapcsolódó publikáció: S8, S9

T4. A kisméretű műanyag fogaskerekek méret-, alak- és helyzethibái jelentősen befolyásolják a fogtőfeszültséget és/vagy a felületi feszültséget a fogakon, ezért fontos ezeknek a hibáknak a felismerése és elkerülése.

Kapcsolódó publikáció: S10

T5. A műanyag fogaskerekek melegedésének számítására leggyakrabban használt képletek kisméretű műanyag fogaskerekek esetén a valóságostól eltérő eredményeket adnak, és a $\vartheta_k=21,3...25,1$ °C, $n_1=273,73...600$ 1/min és $F_t=0,0413...0,2615$ N tartomány esetén, $m=0,5$ mm, $z_1=30$, $z_2=50$ és $b=3$ mm paraméterek esetén 0,8619 korrelációval az alábbi képlettel lehet meghatározni az üzem közbeni hőmérsékletet:

$$\vartheta_{1,2} = \vartheta_k + \left[H_v \cdot P \cdot \mu \cdot \left(\frac{k_{\vartheta}}{b \cdot z \cdot (v \cdot m)^{\frac{3}{4}}} + \frac{R_{\lambda,G}}{A_G} \right) \cdot ED^{0,64} \right] \cdot \left[\left(\frac{\vartheta_k}{21} \right)^3 \cdot (105,89 \cdot P^2 - 53,754 \cdot P + 6,8883) \right]$$

Kapcsolódó publikáció: S11, S12, S13, S14

5. A DISSZERTÁCIÓHOZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK

- S1 Marada I., Csörgő Zs., Kovács S.: FDM nyomtatott PLA és kenderszál erősített PLA fogaskerekek pontosságának vizsgálata, In: Barabás, István OGÉT 2024 - XXXII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia: 32nd International Conference on Mechanical Engineering, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT) (2024) pp. 236-241., 6 p.
- S2 Marada I., Bihari J.: Measuring the effects of faults for the rotational characteristics of small plastic gears, Journal Of Physics-Conference Series 2848: 1 Paper: 012010 (2024)
- S3 Marada I., Bihari J.: Analysis of small plastic gears manufactured by SLS printing, Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye 14: 2 pp. 47-54., 8 p. (2024)
- S4 Marada I., Bihari J.: Comparing the Accuracy of 3D Printing Methods for Small Plastic Gears, Journal Of Physics-Conference Series 3142 Paper: 012015, 8 p. (2025)
- S5 Marada I. Bihari J.: Designing a new type of drive unit for the analysis of small plastic gears, Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye 11: 5 pp. 245-250., 6 p. (2021)
- S6 Bihari J., Marada I.: An Improved Equipment for Measuring Heating Caused by Reactive Loads, IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING 1237: 1 Paper: 012006, 8 p. (2022)
- S7 Marada I., Bihari J.: A kisméretű műanyag fogaskerékpárok átfogatási nyomatékának vizsgálatára szolgáló berendezések összehasonlítása, GÉP 74: 4 pp. 106-109., 4 p. (2023)
- S8 Marada I., Bihari J.: Investigation of tooth thickness faults in small plastic gears, Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye 14: 2 pp. 158-166., 9 p. (2024)
- S9 Marada I., Bihari J.: Kisméretű műanyag fogaskerekek osztáshibáinak vizsgálata, GÉP 75: 3-4 pp. 65-68., 4 p. (2024)
- S10 Marada I., Bihari J.: The Analysis of Stresses on Small Plastic Gears with Finite Element Simulation, Journal Of Physics-Conference Series 3142 Paper: 012009, 8 p. (2025)
- S11 Marada I., Bihari J.: Calculation Methods and Measurement of the Heating of Small Plastic Gears, Lecture Notes In Mechanical Engineering Vehicle and Automotive Engineering 4 pp. 223-236. Paper: Chapter 20, 14 p. (2022)
- S12 Marada I., Bihari J.: Comparison of Methods for Calculating the Heating of Plastic Gears, IOP Conference Series: Materials Science Anc Engineering 1237: 1 Paper: 012007, 10 p. (2022)
- S13 Marada I.: A kisméretű műanyag fogaskerekek melegedésének számítására szolgáló módszerek összehasonlítása, In: Molnár, Dániel; Molnár, Dóra; Nagy, Adrián Szilárd (szerk.) Tavaszi Szél 2022 / Spring Wind 2022 Tanulmánykötet II., Budapest, Magyarország: Doktoranduszok Országos Szövetsége (DOSZ) 584 p. pp. 297-302., 6 p., (2022)
- S14 Bihari J., Marada I.: A kisméretű műanyag fogaskerekek melegedésének mérése, GÉP 76: 3-4 pp. 23-26., 4 p. (2025)

6. A TÉZISFÜZETBEN FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Bihari, J.: Kisméretű műanyag fogaskerekkel szerelt hajtóművek túrésezési problémái, GÉP 2016/5-6., pp: 14 – 17, 2016.
- [2] Sarka, F., Bihari, J., Takács, Á., Tóbis, Zs.: Test Method for Investigation of Reactive Loads on Gear Drives with Supporting Function, Lecture Notes In Mechanical Engineering 22 pp. 265-272., 8 p. (2021)
- [3] Bihari J., Kisméretű műanyag fogaskerekek tervezési és fejlesztési kérdései, PhD értekezés, Miskolci Egyetem, 2017.
- [4] Bihari J., Kisméretű műanyag fogaskerekre ható külső hatások vizsgálata, GÉP, vol. 68, no. 3, pp. 15–18, 2017.
- [5] Bihari, J. – Kamondi, L.: Kis méretű műanyag fogaskerekek vizsgálata, GÉP 62:(7-8), pp: 21 – 24, 2011.
- [6] 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
- [7] LICHARZ GMBH: Designing with engineering plastics. Licharz GmbH, Buchholz, Németország, 2016.
- [8] DuPont: General Design Principles – Module I., Du Pont de Nemours International SA, Genf, Svác, 2003.
- [9] Erhard, G., Strickle, E: Maschinenelemente aus thermoplastischen Kunststoffen, VDI Verlag, Düsseldorf, 1974.
- [10] Bihari, J.: Kisméretű műanyag fogaskerekes hajtások hibái, GÉP 65:(2), pp: 19 – 22, 2014.