

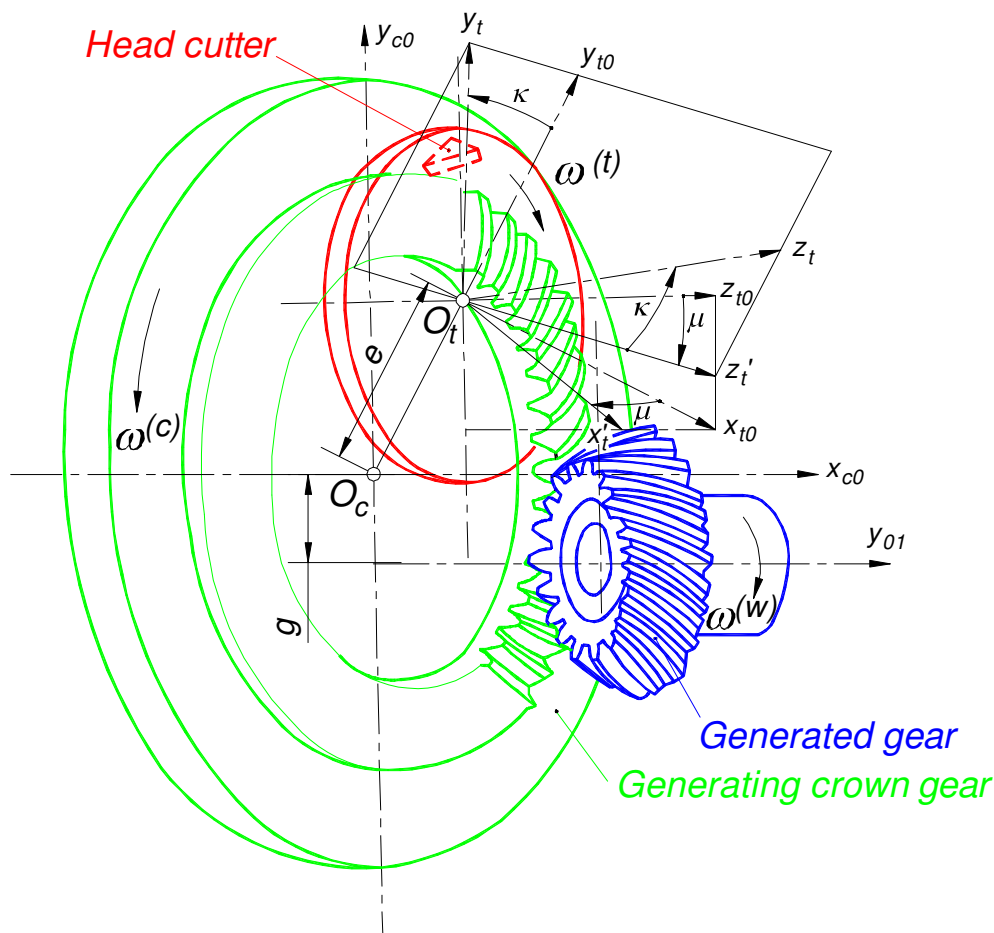
ZÁRÓJELENTÉS

A kedvezőbb kapcsolódás érdekében a kettős legördítéssel gyártott íveltfogú kúpkerék és hipoid fogaskerek korrigált fogfelülettel készülnek, aminek eredményeként az elméletileg konjugált fogfelületek vonalérintkezés helyett pontérintkezés lép fel, lokalizált hordképpel. A fogfelületek módosításának a célja a terheléseloszlás egyenletesebbé tétele, az áttétel ingadozásának a csökkentése, a kenésfeltételek javítása és az élmenti érintkezés elkerülése, amely a gyártásban jelentkező fogfelületi hibák, valamint a beépítés utáni, a kapcsolódó fogaskereknek egymáshoz viszonyított helyzethibái eredményeként jelentkeznek. Az elméleti pontérintkezés terhelés alatt felületi érintkezésbe megy át. A fogfelületek módosítása történhet az elméleti gépbeállítás, vagy a fogfelületet kimunkáló szerszám átmérőjének, illetve profiljának a megváltoztatásával.

Az új, hatszabadságfokú, CNC szerszámgépek kifejlesztésével (mint amilyen a Gleason Phoenix), lehetővé vált egy új, más típusú fogfelületmódosítás a szerszámgépbeállítás megfelelő törvényszerűség szerinti folyamatos változtatásával a megmunkálás folyamán. Ezen új gépek adta lehetőséget alkalmaztuk a fogaskerek optimalizálásához.

1. A kutatások elméleti alapjai

Maghatároztuk a kettős legördítéssel származtatott hipoid fogaskerek és íveltfogú kúpkerék geometriáját a hatszabadságfokú, CNC szerszámgépek mozgáslehetőségeinek függvényében. A fogaskerek fogfelületének a származtatása fogfelületi módosítással ellátott síkkerékkel történt (1. ábra). Annak érdekében, hogy a gyártási pontatlanságokból, szerelési hibákból eredő esetleges fogélfelfekvést elkerüljük, a síkkerék fogfelületének a megalkotása során módosításokat eszközöltünk, mind a fogmagasság, mind a fogalkotó irányában. A fogaskerek fogainak hordósítása érdekében, megnöveltük a síkkerék fogszélességmenti alkotójának görbületi sugarát a síkkerék domború fogoldalán, amellyel a fogaskerek homorú fogoldalát származtatjuk. A fogaskerek optimális foglenyesését, a síkkeréken legördülő szerszám két optimalizált sugarú körívől álló profiljával valósítottuk meg. A járulékos komplex felületmódosítást a szerszám megfelelő, két egymásra merőleges síkbeli bedöntésével értük el. Kivizsgáltuk a fogfelületmódosítást biztosító paraméterek különböző hatványú polinomok szerinti változtatásának a befolyását a pillanatnyi érintkezési pontok nyomvonalának és a "potenciális" érintkezési vonalnak az alakjára és helyzetére a fogaskerek legördülése folyamán, valamint a fogaskerek egyes pillanatnyi helyzeteiben a fogfelületek között fellépő hézag alakjára és nagyságára. Ezen "potenciális" érintkezési vonalak a következőképpen értelmezhetőek: A fogfelületmódosítások eredményeként, terheletlen állapotban, elméletileg pontérintkezés lép fel a kapcsolódó fogfelületek között, azonban terhelés alatt ez a pontérintkezés felületi érintkezésbe megy át. Az általános feltételezések szerint a pillanatnyi érintkezési felület ellipszis alakú. Azonban a témavezető korábbi kutatásai azt bizonyítják, hogy tekintettel a fogfelületmódosítások aránylag kis mértékére (nagyobb felületkorrekciók esetén lényegesen lecsökkenne a fogaskerékpár terhelhetősége), hipoid fogaskerek, kúpkerék és hengeres csigahajtások esetében, az elméleti pontérintkezés terhelés alatt egy meghatározott vonal mentén elhelyezkedő, kis szélességű, felületi érintkezésbe megy át. Ezt a vonalat neveztük el "potenciális" érintkezési vonalnak. Matematikai meghatározása szerint, a "potenciális" érintkezési vonal azon pontok mértani helye, mely pontokban a kapcsolódó felületek közötti hézag minimális értékű a fogaskerek fogszélessége mentén, kapcsolódásuk egy adott pillanatnyi helyzetében. A kapcsolódó felületek közötti hézagot leíró függvény minimalizációjával meghatároztuk a "potenciális" érintkezési vonal pontjainak a koordinátáit.



1. ábra Hipoid fogaskerék származtatása kettős legördítéssel, síkkerék segítségével

Az elméleti kutatásokat a megfelelő számítógépes szimuláció segítette. Az újonnan kifejlesztett számítógépes program segítségével kivizsgáltuk a fogaskerek fogainak kimunkálása folyamán, a szerszámgépen alkalmazott beállítások különböző függvények szerinti változtatásának a befolyását a "potenciális" érintkezési vonalak alakjára és helyzetére, a fogaskerek egyes pillanatnyi helyzeteiben a fogfelületek között fellépő hézag alakjára és nagyságára, valamint a hajtott fogaskerék kinematikai elfordulási szöghibájára, vagyis a fogaskerékpár áttételének az ingadozására.

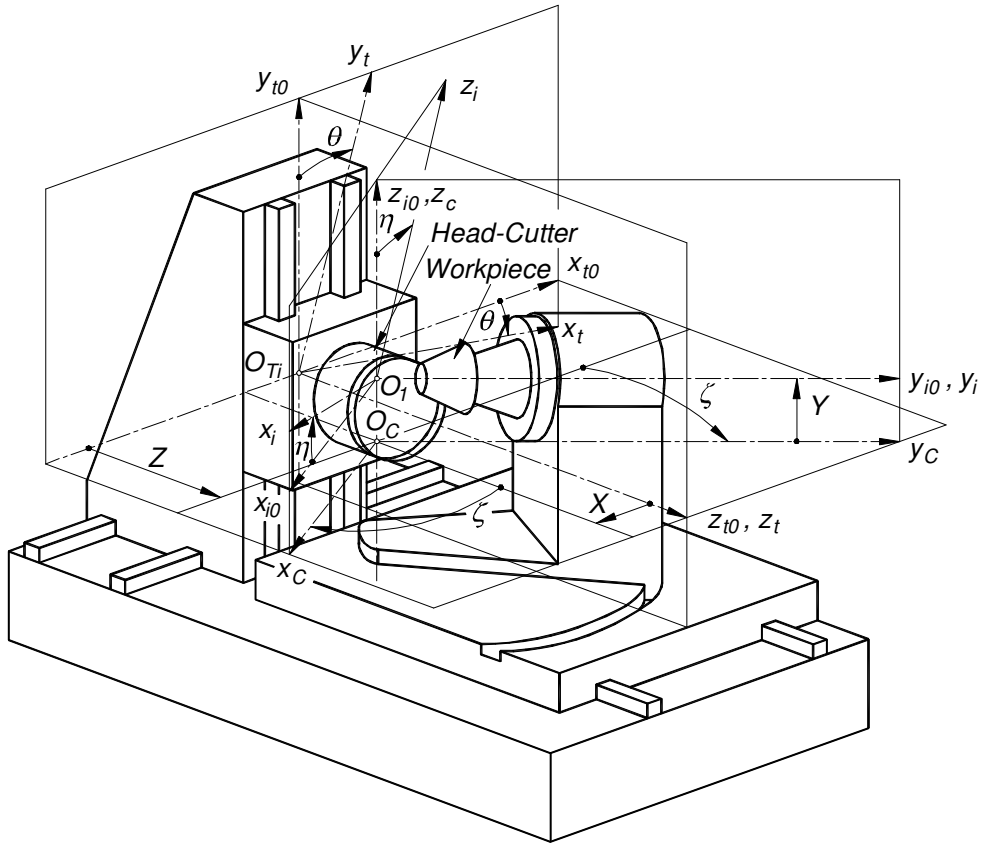
Elvégeztük a fogfelületi módosítással rendelkező, kettős legördítéssel gyártott íveltfogú kúpkerék és hipoid fogaskerek kapcsolódásának terhelés alatti vizsgálatát, ami magában foglalja a terheléseloszlás meghatározását a pillanatnyilag kapcsolódásban lévő fogpárok között, valamint ezen fogpárok érintkezési vonalai (felületei) mentén. A számítási módszer figyelembe veszi a fogak, fogaskeréktestek és tengelyek deformációját, a gyártásból eredő foghibákat, valamint a fogaskerek egymáshoz viszonyított helyzethibáit. A fogak hajlításból és nyírásból eredő deformációit végeelem-módszer alkalmazásával számítottuk: a) a módszer közvetlen alkalmazásával az iterációk során, egy úgynevezett befolyási („influence”) mátrix megalkotásával és alkalmazásával, b) a végeelemes módszeren alapuló számítógépes program sokszoros futtatásával kapott eredmények alapján kifejlesztett egyenletek felhasználásával. Ezen egyenletek megalkotása érdekében kifejlesztettünk egy végeelemes számítógépes programot, amelyben húszcsomópontos, izoparametrikus elemeket alkalmaztunk. A program alkalmazásával meghatároztuk a koncentrált erő által okozott fogdeformációt az erő hatás-

pontjában, valamint a deformációk eloszlását a fogmagasság és a fogszélesség irányában. A végelemek csomópont-koordinátáinak a számítását a fogak valós geometriájára alapoztuk. A fogdeformációk eloszlásgörbéit különböző rendű polinomokkal közelítettük. Ugyancsak kivizsgáltuk a fogaskerekek geometriai adatainak a befolyását a fogdeformációkra és a fogtőben fellépő maximális feszültségekre. Regresszió segítségével egyenleteket alkottunk ezen befolyások matematikai megfogalmazására. Az így kapott egyenletek és a közelítő polinomok alkalmazásával egy számítógépes programot fejlesztettünk ki az aktuális terheléseloszlás számítására és a hajtott nagykerék összetett szögelfordulási hibájának a meghatározására. A programba a tárgyalt fogaskerékpárok valós geometriáját és kinematikáját építettük be. A program alkalmazásával kivizsgáltuk a szerszámgépbeállítási paraméterek befolyását a terheléseloszlási tényezőre, a fogfelületek között ébredő maximális nyomásra, a fogtőben jelentkező maximális feszültségekre és a fogaskerékpár áttétel-ingadozására.

Elvégeztük a kettős legördítéssel gyártott íveltfogú kúpkerékek és hipoid fogaskerekek termo-elasztohidrodinamikusan kenésvizsgálatát. A módszer a Reynolds-féle hidrodinamikai, a rugalmassági, az energetikai és a Laplace-féle hővezetési egyenletek szimultán megoldásán alapul. Figyelembe vettük az olaj viszkozitásának és sűrűségének nyomás- és hőmérséklet függőségét. A számítási módszer a fogaskerékpárok valós geometriáján és kinematikáján alapul, tehát a fogak közötti valós hézag határozza meg a kenőfilm alakját és vastagságát, valamint a fogfelületek valós relatív sebessége szerepel a Reynold's és energia egyenletekben. Az egyenletrendszer bonyolultságára való tekintettel, annak megoldására, a véges különbségek módszerét, numerikus integrálást, valamint a sorozatos közelítések módszerét alkalmaztuk. Eredményként az olajfilmben létrejövő nyomás- és hőmérsékleteloszlást, a fogfelületek deformációját és a fogakban fellépő hőmérsékleteloszlást kaptuk. Ezen eredmények alapul szolgáltak az olajfilm hidrodinamikai terhelhetőségének és az olajfilmben fellépő energiaveszteségeknek a meghatározására. Kifejlesztettük a megfelelő számítógépes programot.

Kidolgoztunk egy módszert a kettős legördítéssel gyártott íveltfogú kúpkerékek és hipoid fogaskerekek fogfelület-módosításának az optimalizálására. Az optimalizálás célja a fogfelületi nyomás és a hajtott fogaskerék elfordulási hibájának a minimalizálása, illetve az olajfilm terhelhetőségének a maximalizálása és az olajfilmben fellépő energetikai veszteségek minimalizálása. Az optimalizálás függvénye ezen feltétel matematikai megfogalmazása, amely súlyozottan veszi figyelembe a követelményeket. Az optimalizálás paraméterei a szerszámgép beállítási adatai és a szerszámgeometria. Ez egy nemlineáris optimalizálási feladat, amely figyelembe veszi az adott peremfeltételeket. Tekintettel arra, hogy az optimalizálás függvénye zárt alakban nem alkotható meg, diszkrét értékei terheléseloszlás-számítással, illetve az elasztohidrodinamikusan kenéselmélet alkalmazásával számítandók. Ebből kifolyólag, a függvény deriváltjainak a számítása is csak numerikusan történhetne. A deriváltak számításának a mellőzése érdekében, a feladat megoldására a direkt keresési módszert alkalmaztuk.

Az így kidolgozott módszer segítségével meghatároztuk az optimális szerszámgeometriát és a szerszámgép beállítási paramétereinek optimális ötödfokú polinomok szerinti változtatásának törvényszerűségét. Kidolgoztunk egy algoritmust, amelynek segítségével a klasszikus fogazógép beállítási paramétereinek polinomokkal történő optimális változtatását átültettük a hatszabadságfokú CNC fogazógépeken végrehajtott mozgások vezérlésébe (2. ábra). Az így kapott eredmények alapján lényegesen, egyes esetekben drasztikusan lecsökkenthető a maximális fogfelületi nyomás és áttétel-ingadozás, illetve megnövelhető a fogfelületek között kialakult olajfilm hidrodinamikai terhelhetősége és csökkenthető az olajfilmben fellépő súrlódási veszteségek.



2. ábra Kettős legördítéssel származtatott ívelt fogú kúpkerékeket és hipoid fogaskerekeket megmunkáló, CNC típusú, szerszám gép mozgásparaméterei

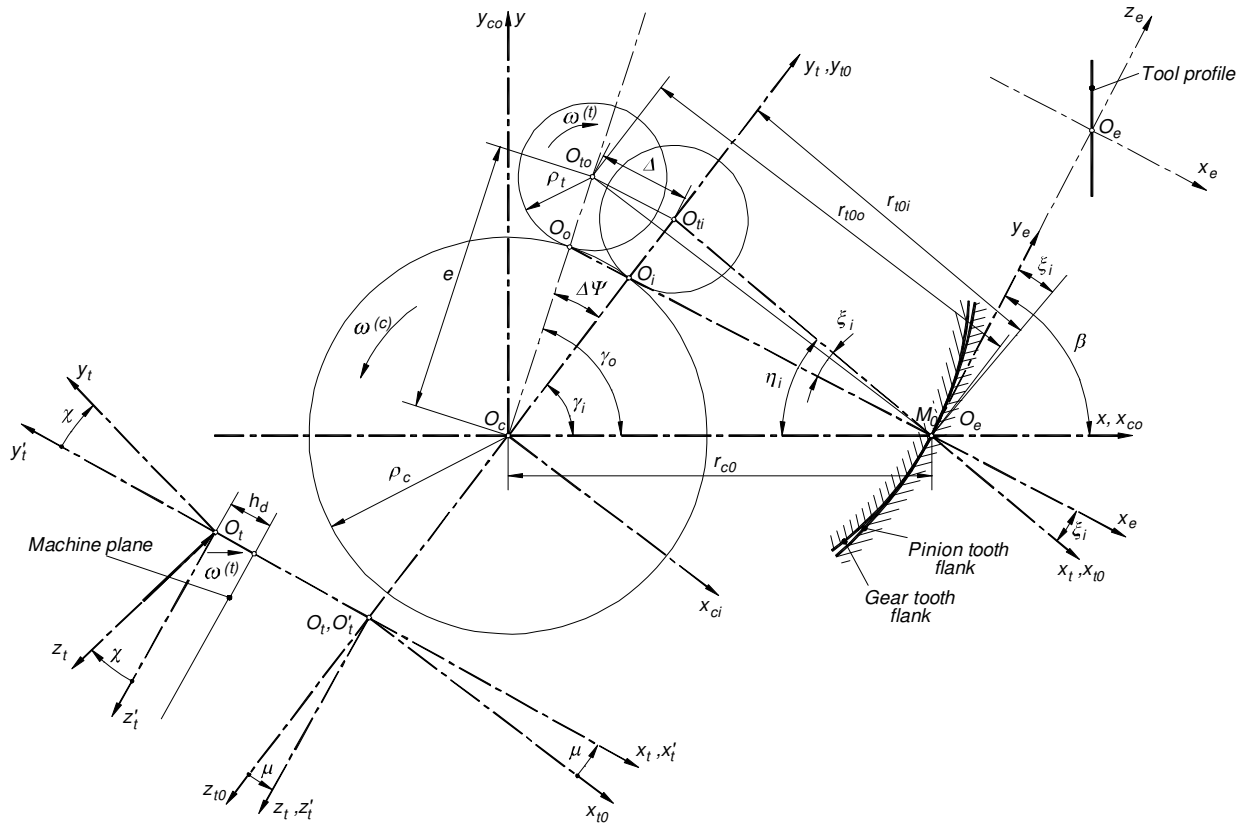
2. Az eredmények kivonatos ismertetése

A kidolgozott módszer segítségével elvégeztük a kétszeres legördítéssel származtatott ívelt fogú kúpkerékek és hipoid fogaskerekek fogfelület-módosításának az optimalizálását. Az optimalizálás célja a maximális fogfelületi nyomás és a hajtott fogaskerék szögelfordulási hibájának a minimalizálása. Az optimalizálás paraméterei (1. és 3. ábra): a szerszámprofil-sugarak (r_{prof1} és r_{prof2}), a szerszám sugar-módosítás (Δr_{i0}), a szerszámbedöntési szögek radiális (κ) és kerületi (μ) irányban, a szerszámbedöntés pontjának a helyzete (h_d), a késfej radiális eltolása (Δe) és a szerszám gép kinematikai lánc áttételének (Δi_{g1}) a változtatása.

A legjelentősebb eredmények a következőképpen foglalhatók össze:

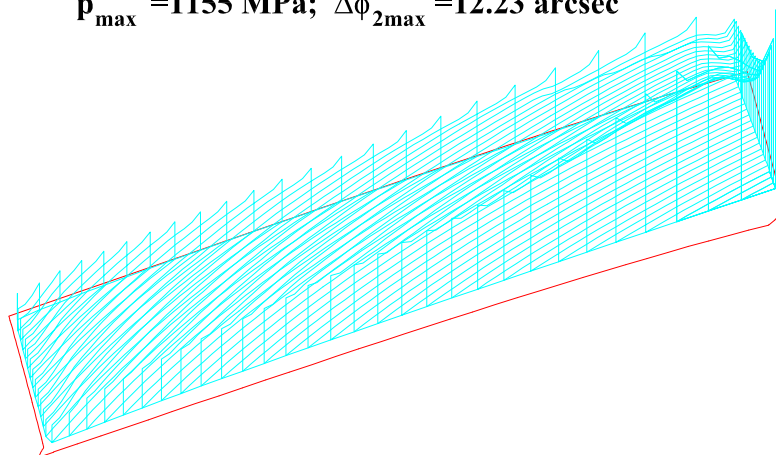
A következő alapadatokkal rendelkező, kettős legördítéssel származtatott ívelt fogú kúpkerékpárt vizsgáltuk: fogszámok 12 és 36, modul 4.941 mm , alap-profil szög 20° , fogferdeségi szög 35° , fogszélesség 25.4 mm . A szerszám-geometria és gépbeállítási paraméterek optimalizált értékei: $r_{prof1} = 554 \text{ mm}$, $r_{prof2} = \infty$, $\Delta r_{i0} = 0.5619 \text{ mm}$, $\kappa = \mu = 0$, $h_d = 0.0958 \text{ mm}$, $\Delta i_{g1} = 0$. Ezen gyártási paraméterértékek alkalmazásával a maximális fogfelületi nyomás 62%-kal ($p_{max} = 1155 \text{ MPa}$ -ról $p_{max} = 437.7 \text{ MPa}$ -ra) a hajtott fogaskerék szögelfordulási hibája pedig 70%-kal ($\Delta \phi_{2max} = 12.23 \text{ arc sec}$ -ről $\Delta \phi_{2max} = 3.63 \text{ arc sec}$ -ra) csökkent (4. és 5. ábra). Az eredmények, $T = 80 \text{ Nm}$ nyomaték átvitele esetére érvényesek. Lényeges, hogy a

további számítások szerint, alkalmazva ugyan ezen fogfelület-korrekciókat, az átvitt nyomaték változása esetén is javulnak az üzemi mutatók, igaz hogy, valamivel kisebb mértékben.



3. ábra A szerszám és a származtató síkkerék relatív helyzete

$$p_{\max} = 1155 \text{ MPa}; \Delta\phi_{2\max} = 12.23 \text{ arcsec}$$

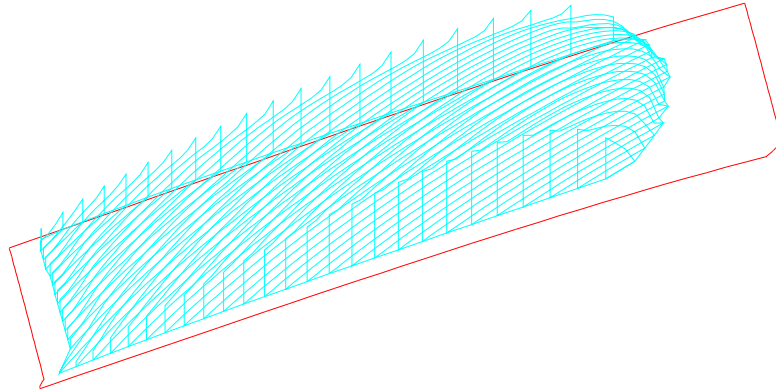


4. Fogfelületi nyomáseloszlás a potenciális érintkezési vonalak mentén nem módosított fogfelületek esetében

Megjegyzendő, hogy a szerszám-geometria és gépbeállítási paraméterek célirányú optimalizálásával sikerült lényegesen lecsökkenteni a gyártásban jelentkező fogfelületi hibák, vala-

mint a beépítés utáni, a kapcsolódó fogaskerekeknek egymáshoz viszonyított helyzethibáinak a befolyását a maximális fogfelületi nyomásra és áttétel-ingadozásra.

$$p_{\max} = 437.7 \text{ MPa}; \Delta\phi_{2\max} = 3.63 \text{ arcsec}$$



5. Fogfelületi nyomáseloszlás a potenciális érintkezési vonalak mentén optimalisan módosított fogfelületek esetében

A kidolgozott optimalizálási módszer további alkalmazásával meghatároztuk az optimális szerszámgeometriát és a szerszámgép beállítási paramétereinek optimális ötödfokú polinomok szerinti változtatásának törvényszerűségét. Az alkalmazott polinomok:

$$\kappa = c_{10} + c_{11} \cdot (\psi_{c1} - \psi_{c10}) + c_{12} \cdot (\psi_{c1} - \psi_{c10})^2 \dots + c_{15} \cdot (\psi_{c1} - \psi_{c10})^5$$

$$\mu = c_{20} + c_{21} \cdot (\psi_{c1} - \psi_{c10}) + c_{22} \cdot (\psi_{c1} - \psi_{c10})^2 \dots + c_{25} \cdot (\psi_{c1} - \psi_{c10})^5$$

$$h_d = c_{30} + c_{31} \cdot (\psi_{c1} - \psi_{c10}) + c_{32} \cdot (\psi_{c1} - \psi_{c10})^2 \dots + c_{35} \cdot (\psi_{c1} - \psi_{c10})^5 \quad ($$

$$\Delta e = c_{40} + c_{41} \cdot (\psi_{c1} - \psi_{c10}) + c_{42} \cdot (\psi_{c1} - \psi_{c10})^2 \dots + c_{45} \cdot (\psi_{c1} - \psi_{c10})^5$$

$$\Delta i_{g1} = c_{50} + c_{51} \cdot (\psi_{c1} - \psi_{c10}) + c_{52} \cdot (\psi_{c1} - \psi_{c10})^2 \dots + c_{55} \cdot (\psi_{c1} - \psi_{c10})^5$$

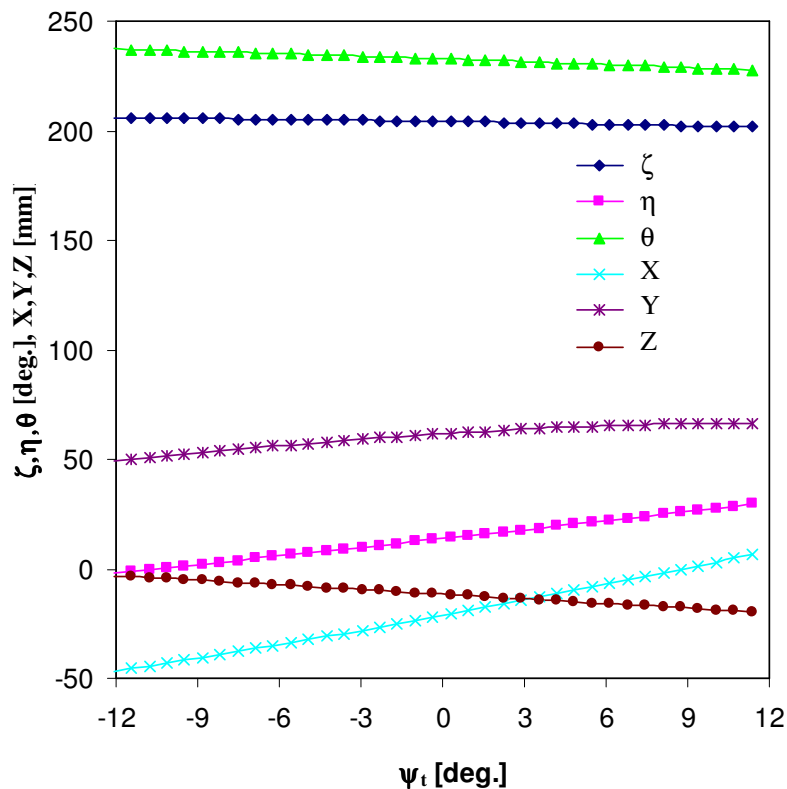
ahol ψ_{c1} a síkkerék elfordulási szöge a kiskerék származtatása alkalmával. A polinomok együtthatóinak számított optimális értékei az 1. táblázatban adóttak.

1. táblázat A c_{ij} együtthatók optimális értékei

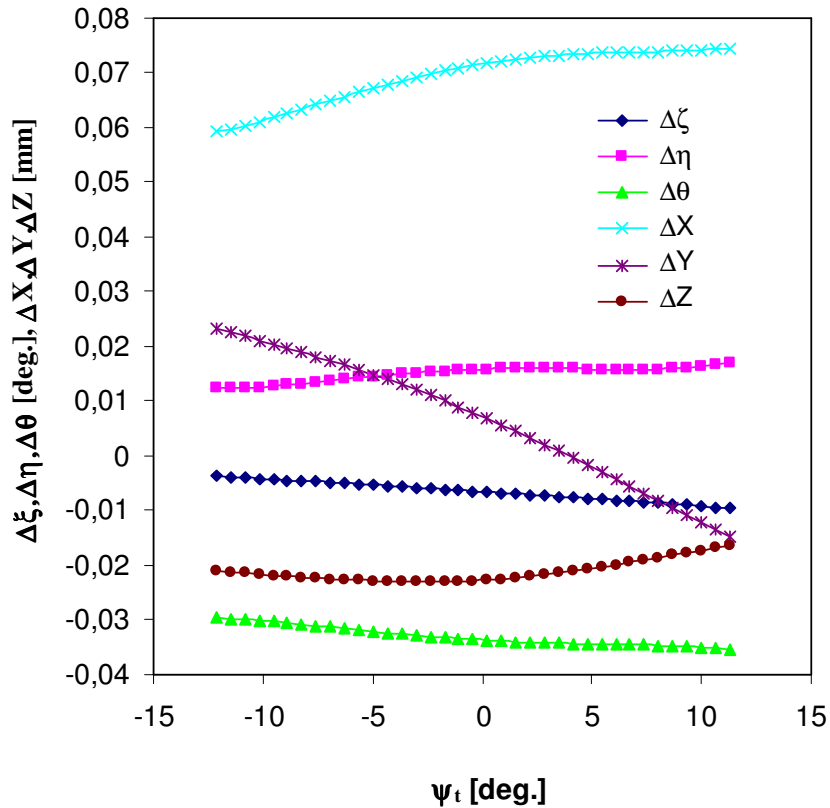
For	$j=0$	$J=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$	$j=5$
κ	0	0	-0.000833	-0.006658	-0.001492	-0.001442
μ	0	0	-0.001958	0.003917	0.005750	-0.003583
h_d	0.07170	0	0.001667	-0.081333	0.014167	0.019167
Δe	0.01517	0.001167	0.003533	0.001917	0.003583	0.003583
Δi_{g1}	0	0	-0.001667	0.001667	0.048333	0.011667

A gépheállítási paraméterek ezen polinomok szerinti optimális változtatásával a maximális fogfelületi nyomás $p_{max} = 369.5 MPa$ -ról $p_{max} = 342.4 MPa$ -ra, a hajtott fogaskerék szögelfordulási hibája pedig $\Delta\phi_{2max} = 8.87 arc sec$ -ről $\Delta\phi_{2max} = 0.79 arc sec$ -ra csökkent.

Meghatároztuk az összefüggéseket a CNC (2. ábra) és a klasszikus (3. ábra) kettős legrördítéssel származtatott íveltfogú kúpkerékeket és hipoid fogaskerekeket megmunkáló szerszámgépek mozgásparamétereinek között. A 6. ábra a CNC fogazógép mozgásparamétereinek a változását szemlélteti a klasszikus fogazógép szerszámelfordulási szögének (ψ_t) a függvényében, nem módosított fogfelülettel rendelkező hipoid fogaskerékpár esetében. A 7. ábra a CNC fogazógép mozgásparamétereinek a változását mutatja be optimális fogfelületmódosítások alkalmazása esetén.



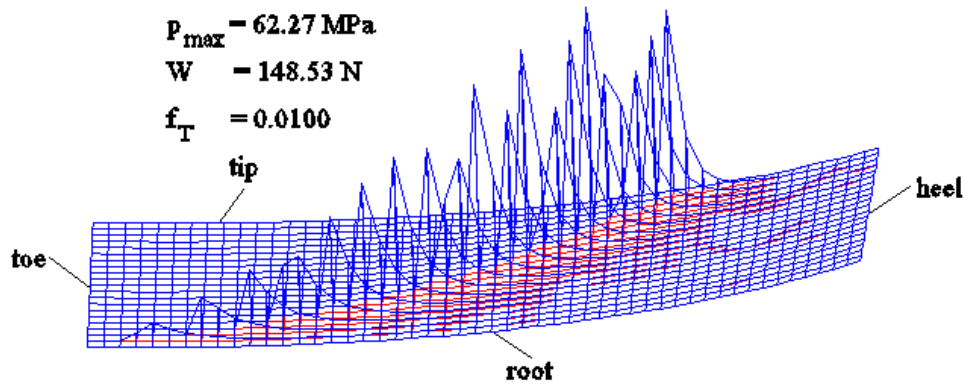
6. ábra A CNC fogazógép mozgásparamétereinek változása a klasszikus fogazógép szerszámelfordulási szögének (ψ_t) a függvényében



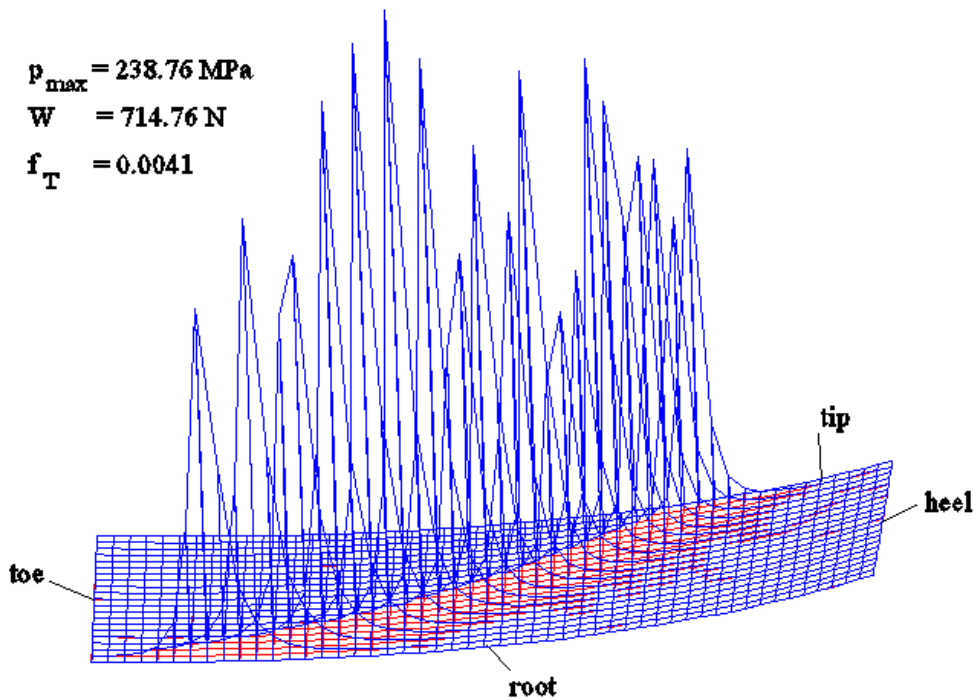
7. ábra A CNC mozgásparamétereinek változása fogfelület-módosítások esetén

Az erre a feladatra kifejlesztett számítógépes program alkalmazásával megvizsgáltuk az üzemi feltételek (sebesség, érdesség) és a szerszámgép-beállítási paraméterek befolyását a kenési viszonyokra és paraméterekre. Meghatároztuk az alkalmazott olajok és üzemi körülmények, valamint a foghibák és a fogaskerekek helyzethibájának a befolyását az olajfilmben fellépő maximális nyomásra és hőmérsékletre, valamint a fogaskerékpár hidrodinamikai terhelhetőségére és az olajfilmben fellépő veszteségekre.

Az általunk kifejlesztett módszert alkalmazva, elvégeztük a kettős legördítéssel származtatott íveltfogú kúpkerékek és hipoid fogaskerekek fogfelület-módosításának az optimalizálását az elasztohidrodinamikusan kenés feltételeinek a javítása érdekében. Az optimalizálás célja az olajfilm elasztohidrodinamikai terhelhetőségének a maximálása és az olajfilmben fellépő energetikai veszteségek minimalizálása. Íveltfogú kúpkerékpár esetében az olajfilm elasztohidrodinamikai terhelhetőségét sikerült 252%-kal növelni, az olajfilmben fellépő energiaveszteségeket pedig 61%-kal csökkenteni (8. és 9. ábra). Ugyancsak, a megfelelő optimalizálási mechanizmus alkalmazásával sikerült lényegesen lecsökkenteni a gyártási és szerelési hibák kedvezőtlen befolyását az elasztohidrodinamikusan kenési viszonyokra.



8. ábra Nyomáseloszlás az olajfilmben konjugált fogfelületek esetében



9. ábra Nyomáseloszlás az olajfilmben optimalisan módosított fogfelületek esetében

A bemutatott eredmények csak kis részét képezik a kutatási eredményeknek. A részletes eredményeket 9 (4 megjelent, 2 elfogadott, 3 véleményezés alatt álló) impakt faktoros folyóiratcikkekben és 12 konferencia-kiadványban publikáltuk.

A véleményezés alatt álló, impakt faktoros folyóiratcikkek:

1. Simon, V., "Optimization of Face-Hobbed Hypoid Gears", *Mechanism and Machine Theory*, (under review).
2. Simon, V., "Optimal Machine Tool Settings for the Manufacture of Face-Hobbed Spiral Bevel Gears", *ASME Journal of Mechanical Design*, (under review).
3. Simon, V., "Reduction of the Influence of Misalignments on Operating Characteristics in Face-Hobbed Hypoid Gears", *Meccanica*, (under review).