

Csigamarók aktív felületeinek 3D mérés utáni kiértékelése

Evaluation of Gear Hob Teeth Active Surface on 3D Measuring Data

HODGYAI Norbert¹, dr. MÁTÉ Márton², dr. Mircea Viorel DRĂGOI³, dr. TOLVALY-ROȘCA Ferenc⁴,

¹ Sapientia EMTE, hodgyai@ms.sapientia.ro,

² Sapientia EMTE, mmate@ms.sapientia.ro,

³ Brassói „Transilvania” Egyetem, dragoi.m@unitbv.ro,

⁴ Sapientia EMTE, tferi@ms.sapientia.ro

Abstract

In the spite of arising novel and performant involute gear cutting technologies, gear-hobs stays as most popular and widespread gear cutting tool. Numerous theoretical research was performed for perfecting this cutting tool, but nowadays it still results with a theoretical profile error. This error changes with the number of re-sharpenings and by this it induces a variable profile error on the machined gear. The present paper deals with a data processing and computing method which makes possible the numerical definition of the cutting edges, with adequate precision. Using this, the modelling of the limiting surfaces of the meshing surface of the cutting tool becomes possible.

Keywords: gear-hob, rake face, relief face, 3D measuring, edge.

Kivonat

A modul csigamaró, annak ellenére, hogy új technológiák is sikeresen jelennek meg, az evolvens hengeres külső hajtópár leggyakrabban alkalmazott lefejtő szerszáma. Számos kutatás és tanulmány ellenére, e szerszám elméleti profilhibával készül. Az elméleti profilhiba az élezések során változik, és ez által a gyártott fogaskerék profilhibáját befolyásolja. Jelen dolgozat célja egy olyan mérési és adatfeldolgozási eljárás ismertetése, amelynek eredményeképpen számszerűen, megfelelő pontossággal, meghatározhatóvá válnak a csigamaró valós élei. Ezekkel a továbbiakban a lefejtő határfelületek modellezése lehetővé válik.

Kulcsszavak: csigamaró, homlokl felület, hátfelület, 3D mérés, él.

1. BEVEZETŐ

A modul csigamaró a jelen fogaskerékgyártás még mindig a legnépszerűbb lefejtő szerszáma. Egy, a világ fogaskerékgyártását és piacát elemző gazdasági tanulmány szerint ennek az ágazatnak a forgalma 2025-re elérheti a 39.4 milliárd USD-t [1]. Ugyanez a forrás kiemeli, hogy a megmunkálás népszerűségi – vagy gyakorisági – sorrendje a csigamarós lefejtés, a metszőkerek vésés és a köszörülés. A fogaskerékgyártás általános jellemzésével (termelést, gyártást, szerszámozást és mérést figyelembe véve) foglalkozó kutatók véleménye szerint is a csigamarós lefejtés még mindig a legnagyobb népszerűségnek örvend [2], annak ellenére, hogy a fogaskerék-hámozás iránti érdeklődés növekvőben van [3],[4].

A csigamarót, mint fogaskerék-lefejtő szerszámot először 1856-ban Christian Schiele német mérnök javasolta, viszont ötletét, a szerszám kialakításakor ébredő műszaki nehézségek miatt kivitelezhetetlennek minősítették. A csigamaró akkor lépett a porondra, amikor az amerikai George B. Grant a világ első ismert csigamarós lefejtőgépét szabadalmaztatta (U.S. patent 405,030 "Machine for Cutting Spur and Worm Gears", 1889), és nemsokára a német Hermann Pfauter megépítette Chemnitzben az első európai csigamarós lefejtő szerszámgépet. A csigamaró elkészítése és karbantartása még mindig megkérdőjelezhető volt, addig a pillanatig, amikor 1907-ben, Az Ohio állambeli Hamilton városban Hans Baerbalck feltalálta az egyetemes esztergapadra illeszthető hátraesztergáló készüléket, mely (US Patent: 870759 - Relieving Mechanism for Engine Lathes -1907), amely a későbbi hátramunkáló esztergák őse. A gyorsacél feltalálásával a csigamarós fogaskerékgyártás szárnyra kapott, és egyre szélesebb körben terjedt el. A csigamarós lefejtés komoly kihívásnak számított ezek után, és a következő, három irányba tagolódott [5]: geometria és felületburkolás-

vizsgálat, forgácsolás és forgácsolási feltételek, illetve konstrukció. A felületburkolás irányában fejlesztett matematikai modellek kivétel nélkül elfogadják azt a tényt, hogy a csigamaró egy olyan, forgácsoló tulajdonságokkal bíró csiga, amelynek élei a mozgás során egy elméletileg tökéletes fogasléc belső felületét simítják végig. Ez a modell nem veszi figyelembe a csavarhatást, ami miatt elméleti profilhiba keletkezik, melynek értéke a csigamaró vezércsavarvonalának dőlésszögével arányosan növekszik [6]. A csigamaró profilhibájának túrértékében való tartását úgy valósították meg, hogy az osztóhengeri csavarvonal (vezércsavarvonal) dőlésszögének értékét 2° alatt tartják – legalábbis a simító szerszámok esetében. A hátraesztérgált fogak, a homlokfelületen végrehajtott újraélezés következtében átmérő-csökkenést szenvednek el, ami szintén profiltorzulást eredményez, mely szintén hozzájárul az elméleti profilhiba növekedéséhez [7], [8]. A helytelen élezés és a gyártott fogaskerék profilhibája közötti összefüggést részletesen Radzewich tanulmányozta, és kimutatta, hogy a gyártott fogaskerék profilján, a fogfejen és a foglábban nem kívánt anyagföbblet, illetve lenyesés jöhet létre, az evolvens profil viszont egyetlen esetben sem lesz tökéletes [9].

A szakirodalomban meggyökeresedett nézeteket saját kutatásaink részben igazolták, részben pedig cáfolták. Arra vonatkozna, hogy milyen csigából kell a csigamarót származtatni, a gyártók két megoldás mögé sorakoztak fel: Az elméleti lefejtés-pártiak az evolvens csigából származott csigamaró mellett döntöttek, ugyanis a geometriai kinematika elvei alkalmazásával kimutatható, hogy az evolvens csiga az evolvens fogaskerékkel pontban érintkezik, miközben mindkettő egy-egy léccel kapcsol, vonalszerű érintkezésben, úgy, hogy a két léc iránya kitérő és, a fogirány mentén, egymáson elcsúsznak a fogfelületek. Ezt az elvet Litvin a két, egybevágó, sablon-ellensablonként kapcsolódó származtató felületek által generált fogfelületekkel magyarázza [6]. Érdekesnek tartottuk a fordított eset vizsgálatát, amikor a csigát tekintjük egy származtató felületsereg egyparaméteres burkolójának. Egyenesfogú fogasléc és csiga kapcsolódását vizsgálva kimutattuk, hogy az egyenesfogú fogasléc burkoló csigája valóban az evolvens csiga [10]. Ebből viszont nem következik – ahogy azt későbbi, még nem publikált kutatásaink is igazolták –, hogy az evolvens fogaskereket is hibamentesen fejt le az evolvens csigamaró. A csigamaró hátfelületét Radzewich olyan csavarfelületként definiálja, melynek egyenes származtatógörbéje a csavartengelyt metszi és erre merőleges [9]. Ennek köszöretülésére Maros és szerzőtársai frappáns, elegáns, az ábrázoló geometria és a differenciálgeometria segítségével megoldott szerkesztést ajánlanak a köszörűtárcsa profiljára [11]. Figyelembe véve a kor műszaki megoldásaiban akkor igen gyéren vagy egyáltalán nem létező számjegyzérlésű köszörűgépeket, a szerszám profilozása sablon után kellett történnjen, az elkerülhetetlen hibákkal együtt. A gyakorlatban, a csigamaró homlokfelületének köszörülésekor két beállítást alkalmaznak: a kis dőlésszögre hivatkozva alkalmazzák az egyetlen paraméteres megoldást, amikor a köszörűtárcsa tengelyét a csigamaró tengelyéhez képest $90^\circ - \lambda_0$ val forgatják el, és a kétparaméteres megoldást, amikor a vezércsavarvonal dőlésszögének figyelembevételével mellett még egy pótkidöntést is alkalmaznak, mely a kúpos köszörűszerszám profilszöge szerint van kiszámítva. Az első esetre nézve kiszámítottuk, hogy a köszörült felület nem burkolással, hanem sorozatos felület-elmetszések következményeképpen jön létre [12], [13]. A második esetet Qin és munkatársai részletesen tanulmányozták, és a bedöntési szög korrekciójával próbálkoztak, de tökéletes burkoló profilt ők sem találtak.

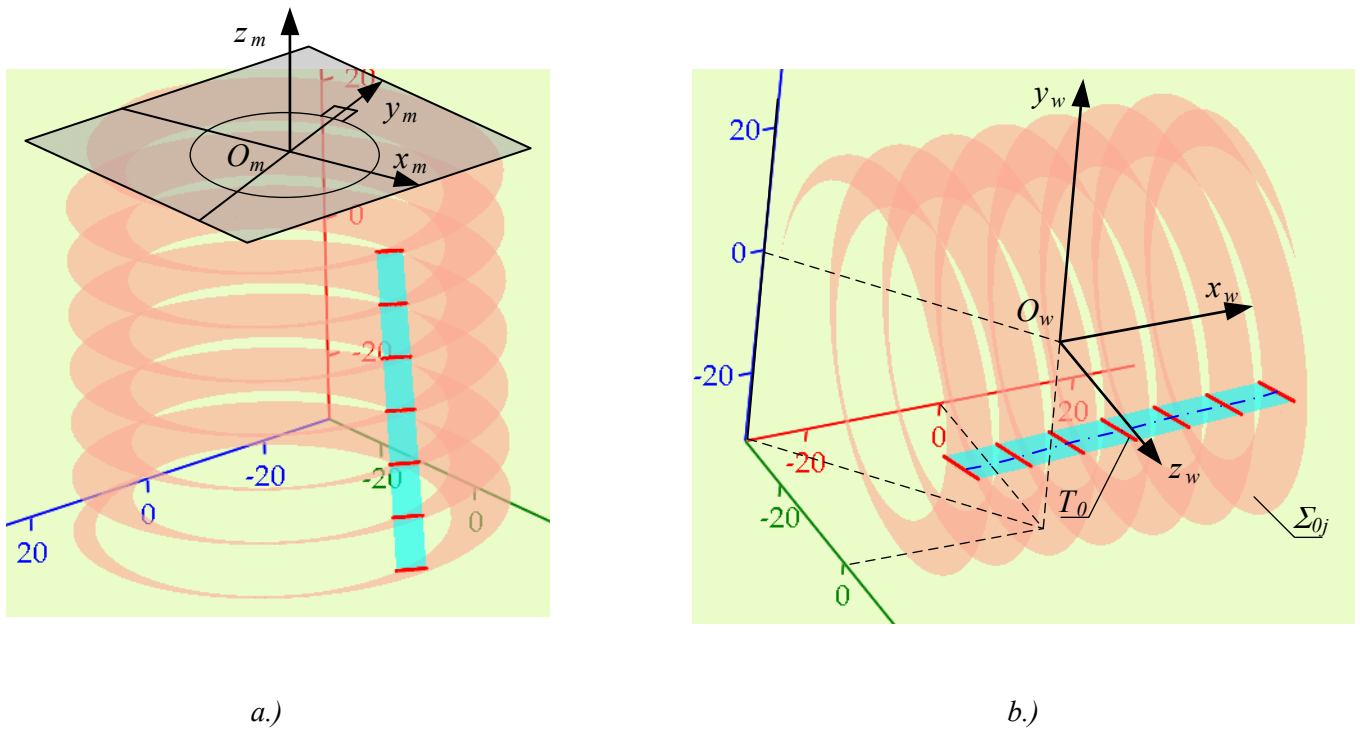
A csigamaró hátfelületeit foganként köszörülik hátra. A köszörűszerszám legtöbbször egy egyenesprofilú, szimmetrikus, kettős kúpos tárcsa, melyet a vezércsavarvonal λ_0 dőlésszögével döntenek be a fogárokba. A hátfelület generálása viszont a tárcsa felületének folyamatos görbületváltozását követelné meg, hiszen a hátramunkáló vezérgörbe, a csavarvonal menti haladás miatt, kúpos csavarvonal lesz. Innen sejthető, hogy a hátfelület sem burkolással, hanem elmetszések sorozataként jön létre. Meg kell jegyeznünk, hogy amennyiben a tárcsa alakú szerszám helyett kúpos köszörűszárat használunk, akkor valószínűleg hibamentesen jön létre a hátfelület; tárcsa alakú szerszám használata esetén viszont a profilhiba a tárcsa profiljától, átmérőjétől és a kinematikai hibáktól is függ. A számítások is, illetve a gyártástechnológia is bonyolultabbá válik, ha a csigamarót módosított profilú hajtás gyártására fejlesztjük ki [15].

Összességében levonhatjuk a következtetést, hogy a lefejtő csigamaró, önmagában, a koncepciójából fakadó elméleti profilhibáján kívül, a gyártásából fakadó elméleti és kivitelezési hibákat is tartalmazza. A fogaskerék ezen kívül a beállítási (tájékoztató) és a kinematikai lánc hibáival is terhelt lesz. A fogaskerék várható hibáinak megbecslésében elengedhetetlenül szükséges a megvalósult élek geometriai ismerete. Ezt 3D mérés útján kaphatjuk meg. Igen figyelemreméltó ezirányban a Balajti és munkatársai által kifejlesztett, két CCD-kamerás mérési módszer, amely a két képsíkból alkotja meg a háromdimenziós modellt [16], [17]. A várható fogfelület szimulációjához az élpont koordinátákat kell ismernünk, a csigamaróhoz csatolt koordináta-rendszerben. A 3D mérés viszont felület-mapping útján valósul meg. Ez a feladatot máris megnehezíti, mert az élet közvetett módon tudjuk meghatározni, a homlok- és a hátfelület mérését követően. A továbbiakban az erre kifejlesztett eljárást ismertetjük.

2. AZ ÉLPONTOK KISZÁMÍTÁSÁNAK MATEMATIKAI MODELLJE

2.1. Az elméleti és a mérési koordináta-rendszer kapcsolata

Az elméleti és a gyakorlati koordináta-rendszer kapcsolatát az 1. ábrán szemléltetjük. Az elméleti $O_w x_w y_w z_w$ koordináta-rendszert a csigamaró és a lefejtett fogaskerék kapcsolatának matematikai modellje alapján definiáltuk, és ebben a koordináta-rendszerben írtuk fel az élek parametrikus egyenleteit, a származtató csiga és a csavar-homloklfelület metszéseként.



1. ábra. Az elméleti és a mérési koordináta-rendszerek

Ha a csiga csavarfelületének (1.b ábra, Σ_{0j} jobb oldali csavarfelület) az egyenlete általános esetben az

$$\begin{cases} x_w(u, v) = f(u, v, \varphi_1(u, v), i_{12}) \\ y_w(u, v) = g(u, v, \varphi_1(u, v), i_{12}) \\ z_w(u, v) = h(u, v, \varphi_1(u, v), i_{12}) \end{cases} \quad (1)$$

függvények által adottak, ahol az f, g, h folytonos függvények a csiga és a fogazott kerék kapcsolódásából származnak, a homloklfelület egyenlete pedig

$$\begin{cases} x_\gamma(\theta) = p_\gamma \theta \\ y_\gamma(w, \theta) = c_y(w) \cos \theta + c_z(w) \sin \theta \\ z_\gamma(w, \theta) = -c_y(w) \sin \theta + c_z(w) \cos \theta \end{cases} \quad (2)$$

Ahol $c_y(w), c_z(w)$ a homloklfelület generáló görbéje az $x_w = 0$ síkban, p_γ pedig a homloklfelület csavarparamétere, akkor a (2) egyenletekből ki lehet ejteni a w és θ paramétereket, és egy $F_\gamma(x_w, y_w, z_w) = 0$ implicit egyenlethez jutunk. Ebbe behelyettesítjük az (1) koordináta-függvényeket és a csiga felületének u, v paraméterei között összefüggést találunk:

$$F_\gamma(x_w(u, v), y_w(u, v), z_w(u, v)) = 0 \rightarrow u = u(v) \vee v = v(u) \quad (3)$$

Amennyiben a (3) összefüggést nem sikerül kvadratúrával felírni, mert transzcendens egyenletekhez jutunk, akkor megvizsgáljuk a paraméterek lehetséges értelmezési tartományát, úgy, hogy a csigafelület láb- és fejhengere közötti részére korlátozzuk a számítást. Legyen $u \in [u_1, u_2]$ úgy, hogy $r_f \leq \rho(u) \leq r_a$,

$\rho = \sqrt{x_w^2 + y_w^2}$. Az $[u_1, u_2]$ intervallumot $N - 1$ részre osztjuk és felállítjuk az $(u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_N)$ N elemből álló sorozatot (lehetőleg úgy, hogy ezeknek számtani haladványt alkotó $\rho_i, i \in \overline{1, N}$ sugársorozat feleljen meg, a pontok minél egyenletesebb elosztása céljából), majd pedig numerikusan megoldjuk minden u_i értékre a (3) egyenletet, és ezeknek megoldásaiból felállítjuk a rendezett $(u_i, v_i), i \in \overline{1, N}$ paraméterpárossorozatot. Ezeket behelyettesítjük az (1) egyenletekbe, és megkapjuk az elméleti élpontok koordinátáit. Legyen az $(x_i^e, y_i^e, z_i^e), i \in \overline{1, N}$ pontsorozat. Ezekkel három, N soros és két oszlopos mátrixot alkotunk, ahol az első oszlopban az élpontok tengelytől való távolsága, a másodikban pedig rendre az x, y, z koordináták találhatóak:

$$\begin{pmatrix} \sqrt{(y_1^e)^2 + (y_1^e)^2} & x_1 \\ \vdots \\ \sqrt{(y_N^e)^2 + (y_N^e)^2} & x_N \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \sqrt{(y_1^e)^2 + (y_1^e)^2} & y_1 \\ \vdots \\ \sqrt{(y_N^e)^2 + (y_N^e)^2} & y_N \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \sqrt{(y_1^e)^2 + (y_1^e)^2} & z_1 \\ \vdots \\ \sqrt{(y_N^e)^2 + (y_N^e)^2} & z_N \end{pmatrix} \quad (4)$$

A (4), az első oszlop szerint növekvő sorrendbe rendezett koordináta-mátrixokra definiáljuk a tengelyhez viszonyított távolság függvényében felírt harmadfokú spline-függvényeket:

$$x_s^e(\rho) = Sp_x(\rho); \quad y_s^e(\rho) = Sp_y(\rho); \quad z_s^e(\rho) = Sp_z(\rho), \quad \rho \in [r_f, r_a] \quad (5)$$

Ezzel az élpontok elméleti helyzetét megkaptuk.

A 3D mérés koordináta-rendszere az elméleti koordináta-rendszertől minden esetben különbözni fog. Ez abból adódik, hogy a mérőgép asztalára helyezett csigamaróra alkalmazott bázisfelületek határozzák meg a mérési koordináta-rendszer helyzetét. Jelen esetben a csigamarót az egyik tájológallérjának homlokfelületével helyezük a mérőgép asztalára, amiből adódik, hogy a z_m tengely iránya az asztalra merőleges. A z_m tengely tényleges helyzetét a furaton felvett mérőpontok segítségével, a mérőgép automatikusan számítja ki. A mérőrendszer origóját a szerszám felső tájológallér homlokfelületére vesszük fel. A két megmaradt irány közül az x_m tengelyt a reteszhoronymélység határfelületének és az előbb említett felületnek metszésvonalával párhuzamosan illesztjük, ahogyan az 1.a ábrán szemléltettük. Egyértelmű, hogy a két koordináta-rendszer közötti transzformációt kell meghatároznunk, az élpontok mért koordinátáinak ismeretében. A módszerrel, amit bemutatunk, az élkoordinátákat közvetett módon tudjuk meghatározni, mivel a felhasznált 3D mérőgép felületpontok koordinátáit téríti vissza, az él a homlokfelület és a hátfelület metszésvonala. Az élkoordinátákat úgy kapjuk meg, hogy a homlok- és hátfelületeken felvett pontok alapján felírjuk ezek x, y és z koordinátáinak a spline-egyenleteit. A felírás során mindkét felületre ugyanazon paramétereket adjuk meg. Ennek a részletes ismertetésétől jelen közleményben eltekintünk. Legyenek tehát a csigamaró p -edik fogának (a mérés során a fogakat megszámozzuk) élkoordinátái, a mérőrendszerben, $xm_i^p, ym_i^p, zm_i^p, i \in \overline{1, N}$. Kiszámítjuk minden élpont tengelytől való távolságát, és a (4) mátrixokkal azonos szerkezetű mátrixokat állítunk fel, majd pedig ezekre felírjuk az (5) képletekhez hasonló módon, a mért élkoordináták spline függvényeit:

$$xm^p(\rho) = Spm_x^p(\rho); \quad ym^p(\rho) = Spm_y^p(\rho); \quad zm^p(\rho) = Spm_z^p(\rho), \quad \rho \in [r_{min}^p, r_{max}^p] \quad (6)$$

Az (5) képletekben, a spline értelmezési tartományának határai mindig az adott élhez tartozó felületek mérési pontjaiból következnek, amely fogról-fogra változhat.

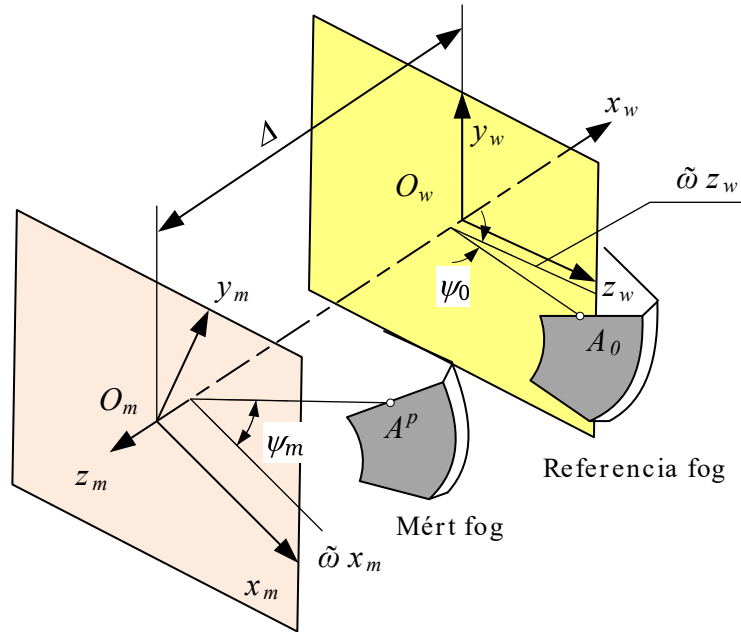
A (6) függvények segítségével kiszámítjuk a vizsgált él osztóhenger pontjának koordinátáit:

$$xm_0^p = Spm_x^p(r_0); \quad ym_0^p = Spm_y^p(r_0); \quad zm_0^p = Spm_z^p(r_0) \quad (7)$$

Az elméleti élek közül a referencia fog éleit tekintjük, Referencia fogként definiáljuk azt a fogat, amely a származtató csiga alapmenetéből származik, vagyis az $O_w x_w y_w z_w$ koordináta-rendszer $(y_w z_w)$ síkjához legközelebb található. Ennek az éleit fogjuk referencia éleknek tekinteni. Mivel elméletileg minden adott oldalhoz tartozó él egybevágó, az összehasonlításához úgy járunk el, hogy az elméleti élet ráforgatjuk a mért élre úgy, hogy a két entitás osztóhenger pontjai egymásra illeszkedjenek. Ezt a műveletet két lépésben hajtjuk végre: átrendezzük az elméleti osztóhengeri élpontkoordinátákat a mérőrendszer tengelyei szerint; az átrendezett elméleti rendszerrel együtt, az elméleti élet a mérőrendszerbe csavarjuk. Az eljárást a 2. ábra szemlélteti. A transzformáció paraméterei a referencia fog vizsgált élének A_0 osztóhengeri pontja és a mért fog A^p osztóhengeri pontja hengerkoordinátáiból következnek:

$$\begin{cases} \varphi = \psi_0 - \psi_m \\ \Delta = -(x^{A_0} + z^{A^P}) \end{cases} \quad (8)$$

A (8) összefüggések és a 2. ábra alapján az elméleti, referencia -élt a mért élpontok sorozatához illesztjük, úgy, hogy $A_0 \equiv A^P$. Az új koordinátákat az



2. ábra. Az elméleti és a mérési koordináta-rendszerek

$$\underline{\mathbf{r}}_m = \mathbf{M}_{wm} \underline{\mathbf{r}}_w \quad (9)$$

transzformációval számoljuk, ahol $\underline{\mathbf{r}}_{0w}$ a referencia-élpontok koordinátái az elméleti $O_w x_w y_w z_w$ koordinátarendszerben, míg $\underline{\mathbf{r}}_{0m}$ a mérő koordináta-rendszerbe ($O_m x_m y_m z_m$) való átvitel utáni koordináták. Hangsúlyozzuk, hogy nem az elméleti élgörbét nézzük a mérési koordináta-rendszerből, hanem ide vittük át a görbét. Ezzel, minden élpontra, az elméleti élgörbével való összehasonlítás lehetségessé válik.

2.2. Az mérés útján előállított élgörbe hibája

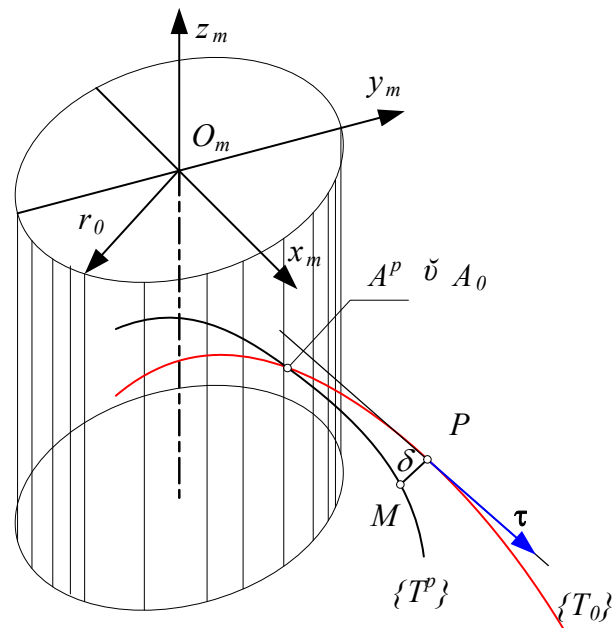
Az élgörbe hibáját az elméleti éltől való távossággal határozzuk meg. A 3. ábrán szemléltetjük ennek geometriai értelmezését. Jelöljük $\{T_0\}$ -val az elméleti élgörbét, és $\{T^P\}$ -vel a vizsgált élgörbét. A vizsgált élgörbe M pontjának távolsága az elméleti élgörbétől akkor és csak akkor fejezhető ki az \overline{MP} szakasz hosszával, ha ez az elméleti élgörbe P pontbeli normálsíkjaiba illeszkedik. Ismertek az elméleti élgörbe parametrikus koordinátái, akár analitikus, akár spline alakban. A (9) transzformáció alkalmazásával az elméleti élgörbét a mérési koordináta-rendszerbe illesztjük, úgy, hogy osztóhengeri pontja a vizsgált élgörbe osztóhengeri pontjával egybeesik. Ez esetben ismeretlenek a P pont koordinátái, jelöljük ennek helyvektorát $\mathbf{r}^P(\rho)$ -val. A P pontban, az elméleti görbe érintővektorát a parametrikus koordináták deriváltjaival állítjuk elő. A P pont helyvektorának paramétere az

$$(\mathbf{r}^P(\rho) - \mathbf{r}_M) \cdot \boldsymbol{\tau}(\rho) = (\mathbf{r}^P(\rho) - \mathbf{r}_M) \cdot \frac{d\mathbf{r}^P(\rho)}{d\rho} = 0 \quad (10)$$

egyenlet gyöke, melyet numerikusan állítunk elő, jelöljük a gyököt ρ_0 val. A keresett δ távolságot a

$$\delta = |\mathbf{r}^P(\rho) - \mathbf{r}_M| \quad (11)$$

kifejezés értéke adja.



3. ábra. Az eltérés számításának geometriai modellje

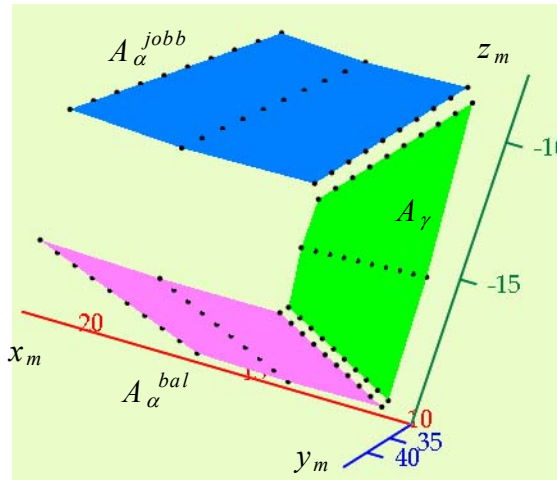
3. GYAKORLATI ALKALMAZÁS

Az előbbieken bemutatott matematikai modellt Mathcad- környezetbe illesztettük, és egy olyan csigamaróra próbáltuk ki, amelynek paraméterei az 1. Táblázatban találhatók.

1. Táblázat: a vizsgált csigamaró paraméterei

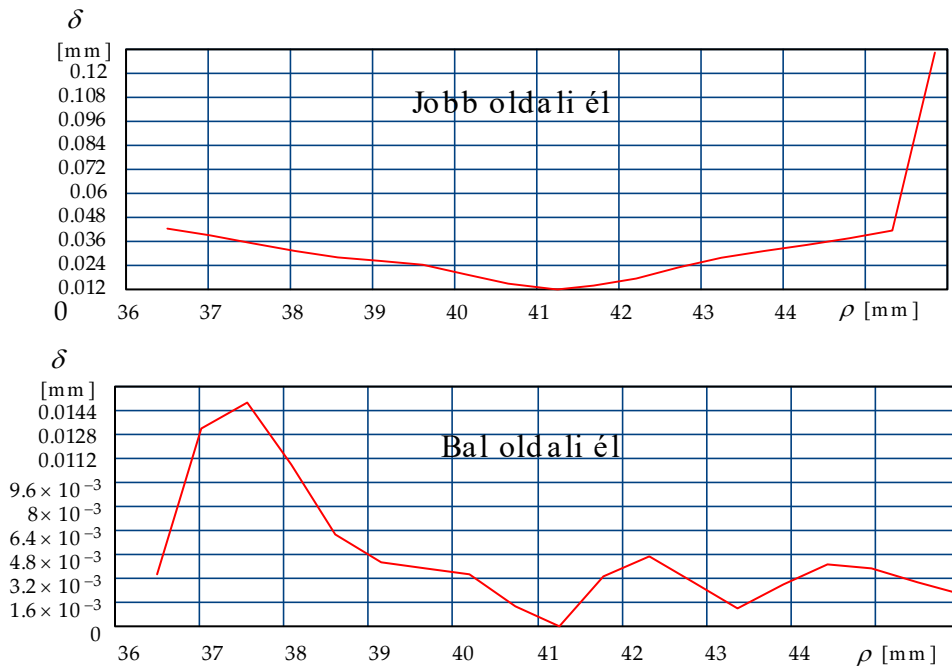
Sorszám	Megnevezés	Jelölés	Érték	Mértékegység
1.	Modul	m	5	mm
2.	Referencia profilszög	α_0	20	fok
3.	Bekezdések száma	z_1	1	-
4.	Fogszám	z_s	10	-
5.	Fejhenger-átmérő	D_a	95	mm
6.	Osztóhenger- átmérő	D_0	82,5	mm
7.	Lábhenger-átmérő	D_f	70	mm
8.	Osztóhenger-csavarvonal- dőlésszög	λ_0	3°28'12,1"	fok
9.	Axiális menetemelkedés	p_{ax}	15.71613	mm
10.	Csavarhorony- menetemelkedés	p_c	4800	mm
11.	Hátraesztergálás	k	5	mm
12.	Homlokszög-érték	γ_0	0	fok

A csigamaró fogait megszámoztuk: az első fog a mérési koordináta-rendszer ($O_m x_m y_m$) síkjához, az asztalra helyezés után a felső gallér határ-homloksíkjához legközelebbi egész fog, majd pedig, sorban, a csavarvonal szerint, az utolsó egész fogig. A mérést nem mindegyik fogon hajtottuk végre, viszont arra vigyáztunk, hogy egy-egy csavar-homloksíkján legalább 3 fog illeszkedjen. A foghoz tartozó két oldal-hátfelületet és homloksíkját 3×10 pontos hálókban mértük (4. ábra.)



4. ábra. A csigamaró fogának aktív felületein felvett ponthálók

Az élprofilhibát az 5. ábrán szemléltetjük, A grafikonok abszcisszáin a valós élpontok tengelytől mért távolságát vettük fel.



5. ábra. Az élek eltérése az elméleti alaktól

4. KÖVETKEZTETÉSEK

A 3D felületmérésből előállított valós élalak hibái azt mutatják, hogy a jobb és a bal oldali él hibaevolúciója nem hasonló. A hiba értéke a jobb oldali élen közel 4-szerese a bal oldali él hibájának, pedig az éleket kiadó felületek ugyanabban a műveletben voltak mérve.

A számított él-eltérés csak informatív jellegű, ebből nem lehet közvetlenül a megmunkált fogaskerék profilhibájára következtetni.

A valós élpontok segítségével viszont meg lehet alkotni két határ- csigafelületet, amivel lefejtett fogprofil határgörbéit ki lehet mutatni, CAD-szimuláció segítségével. Ezzel már meg lehet becsülni a gyártott fogaskerék fogprofiljának várható hibáját, és annak eloszlását.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton fejezzük ki köszönetünket a Brassói „Transilvania” Egyetem Doktori Iskolájának a projekt során nyújtott anyagi támogatásért, valamint az érsekvadkerti ÉDIMODUL Kft.-nek a kísérleti szerszámok kiváló pontosságú elkészítéséért, és nem utolsósorban dr. Kántor József kollégánknak és az Elitex Prodexim kft.-nek a mérések elvégzéséért.

On this way we express our grateful thanks to the Doctoral School of „Transylvania” University of Brasov for the material support of this research, and to the ÉDIMODUL Ltd, Érsekvadkert, Hungary, for the excellent precision manufacturing of all experimental gear hobs arise from this project. Finally, we express our grateful thanks to our colleague, PhD dipl.Eng. József Kántor and Elitex Prodexim Ltd., for his help regarding the measurements of the gear hobs involved in this project.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] *** Verifiedmarketreports. <https://www.verifiedmarketreports.com/product/gear-manufacturing-market/> (Utolsó letöltés: 01.03.2024).
- [2] Qinge Xiao, Congbo Li, Ying Tang b e, Jian Pan, Jun Yu c, Xingzheng Chen: *Multi-component energy modeling and optimization for sustainable dry gear hobbing*. Energy, Volume 187, 15 November 2019, 115911: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115911>.
- [3] Chung-Yu Tsai: *Mathematical model for design and analysis of power skiving tool for involute gear cutting*. Mechanism and Machine Theory, Volume 101, July 2016, Pages 195-208.
- [4] Erkuo Guo, Rongjing Hong, Xiaodiao Huang, Chenggang Fang: Research on the cutting mechanism of cylindrical gear power skiving. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 79, 541–550 (2015). <https://doi.org/10.1007/s00170-015-6816-9>.
- [5] Hodgyai, N., Máté, M., Oancea, Gh., Dragoi, M.V. : *Review: Gear Hobs—Cutting Tools and Manufacturing Technologies for Spur Gears: The State of the Art*. Materials 2024, 17(13), 3219; DOI: 10.3390/ma17133219 , ISSN: 1996-1944.
- [6] Litvin, F.L., Fuentes, A. *Gear Geometry and Applied Theory*. Cambridge University Press, 2009.
- [7] Hollanda, D. *Așchierie și scule*. Editura I.I.S. Tg. Mureș, 1982.
- [8] Máté, M. *Hengeres fogaskerekek gyártószerszámjai*. Erdélyi Múzeum-Egyesület, 2016.
- [9] Radzewich, Stephan: *Gear Cutting Tools: Fundamentals of Design and Computation*. 1st edition. CRC Press;, Boca Raton, UK, 2010.
- [10] Hodgyai, N., Drăgoi, M.V., Máté, M.: *Gear hob base worm modelling from a straight toothed generating rack*. Műszaki Tudományos Közlemények vol. 20. (2024) 24–29. DOI: Hungarian: <https://doi.org/10.33895/mtk-2024.20.05>. English: <https://doi.org/10.33894/mtk-2024.20.05>.
- [11] Maros, D., Killmann, V., Rohonyi, V.: *Angrenaje melcate*. București, Editura Tehnică, 1966.
- [12] Máté, M., Tolvaly-Roșca, F., Hodgyai, N.; Drăgoi, M.V.: *A new approach of defining the grinding wheel profile of the Gear Hob’s Rake Face*. in: 2022 IEEE 22nd International Symposium on Computational Intelligence and Informatics and 8th IEEE International Conference on Recent Achievements in Mechatronics, Automation, Computer Science and Robotics (CINTI-MACRo). 21-22 November 2022. Date Added to IEEE Xplore: 03 February 2023. DOI: 10.1109/CINTI-MACRo57952.2022.10029498. Publisher: IEEE.
- [13] Hodgyai, N., Máté, M., Tolvaly-Roșca, F., Drăgoi, M.V.: *Peculiarities of the Grinding Process of a Gear Hob Helical Rake Face*. Acta Universitatis Sapientiae, Electrical and Mechanical Engineering, 13 (2021) 39-51. DOI: 10.2478/auseme-2021-0004.
- [14] Qin, DT, et. al.: *Sharpening of Hob Cutting Edges with Helical Flutes*. In Proceedings of the International Conference on Mechanical Transmissions. Chongqing, Peoples R China 05-09.04.2001.
- [15] Balajti, Zs. *Determination of Undercutting Avoidance for Designing the Production Technology of Worm Gear Drives with a Curved Profile*. Machines 2023, 11(1), 56; <https://doi.org/10.3390/machines11010056>
- [16] Balajti, Zs., Ábel, J., Dudás, I. *Examination for post-sharpening adjustment of cutting edge of a worm gear hob with circle arched profile in axial section*. Procedia Manufacturing 2021 55(5-8):260-265, DOI: 10.1016/j.promfg.2021.10.037
- [17] Balajti, Zs., Ábel, J. *Edge geometry test method with correctly positioned CCD cameras for production geometrical development of a worm gear hob with arched profile*. Procedia Manufacturing 2020, 51(1):365-372, DOI: 10.1016/j.promfg.2020.10.052.