

Ujjmaró, hosszlyukmaró dinamikai vizsgálata

Dynamic analysis of a flute endmill

MOLNÁR Lóránd
mesterszakos hallgató

afclorand@yahoo.com

Sapientia EMTE, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki tanszék,

Vezető tanára: Dr. MÁTÉ Márton

Kivonat

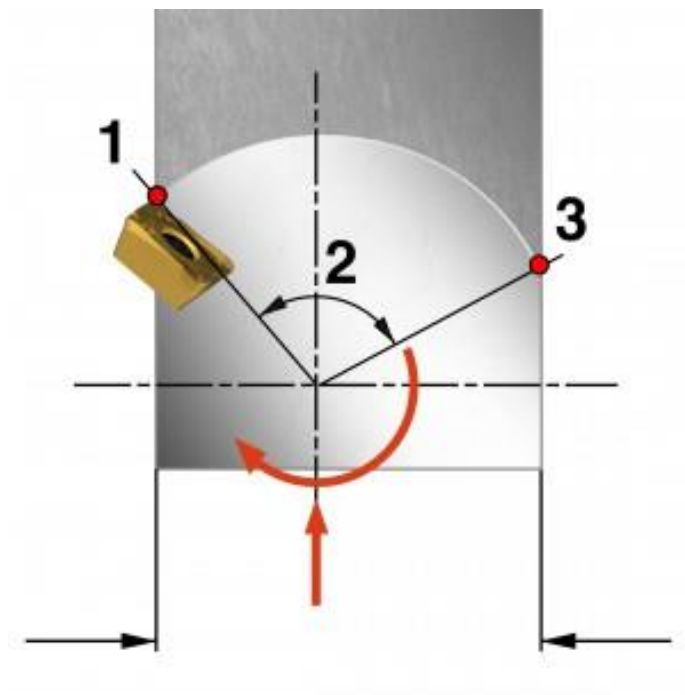
Jelen közlemény a hosszlyukmaró forgácsolási kinematikáját, a forgácsképzés geometriáját, valamint a forgácsolási folyamat alatt ébredő erők hatását, illetve a rezgések kialakulását elemzi. A tárgyalt matematikai modell segítségével következtetni lehet, adott szerszám konstruktív adatainak és forgácsolási paramétereinek ismeretében, a kialakuló rezgések amplitúdójára és körfrekvenciájára.

Kulcsszavak: hosszlyukmaró, forgácsvastagság, forgácsolási paraméterek, forgácsolóerő, rezgések

1. HOSSZLYUKMARÓ: ÉLPONT-PÁLYA ÉS FORGÁCSKÉPZŐDÉS

A forgácsképződés és a marópálya befolyásolják az éltartamot. A marószerszám egyes forgácsoló-élei radiális irányban szakaszosan forgácsolnak. Három különböző fázist veszünk figyelembe egyes fogásvételekben:

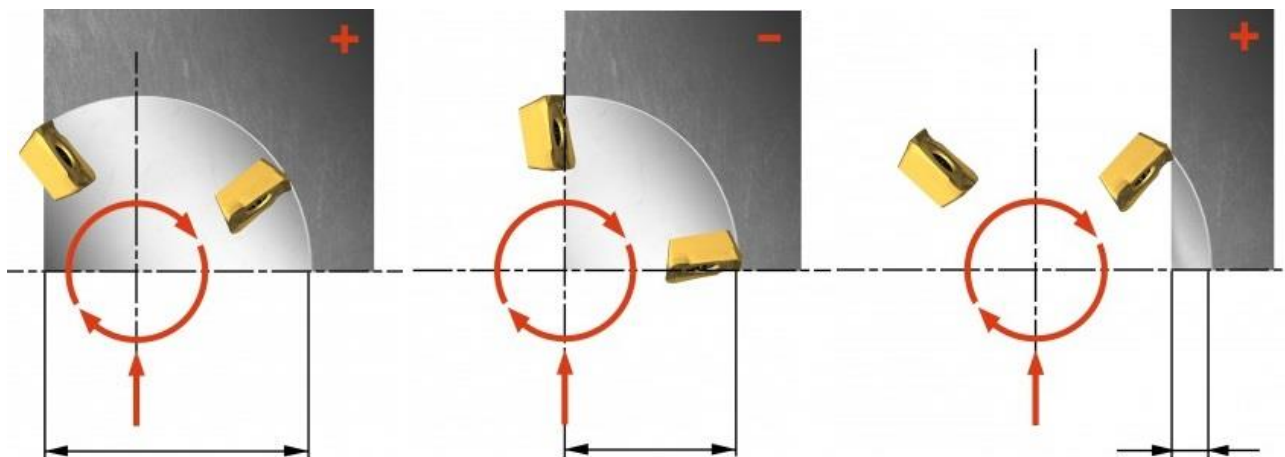
- fogásvétel,
- forgácsív a fogásban,
- kilépés a fogásvételből.



1. ábra

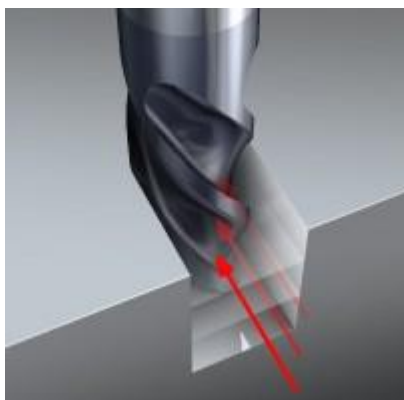
A forgács kiemelésének három fázisa [7]

Fogásvétel során egy részciklus alatt leválasztandó anyagvastagságot értjük. A ábrán szemléltettem a különböző fogásvétel lehetőségeket homlokmaráskor.

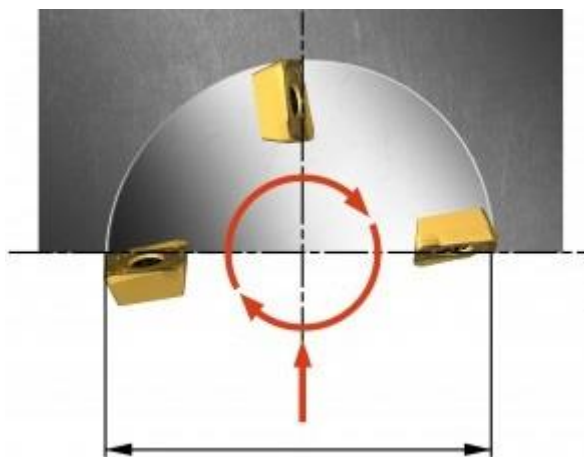


2. ábra
Fogásvétel lehetőségek [7]

A maximális forgácsívét, horonymarás esetén 180° ($a_e = 100\%$ DC) értékűnek vesszük. A hosszú forgácsív következménye abban áll, hogy több hő jut a vágóélre. Nagy radiális erők keletkeznek, ezenkívül értelemszerűen hosszabb a fogásban töltött idő.



3. ábra. Horonymarás [7]

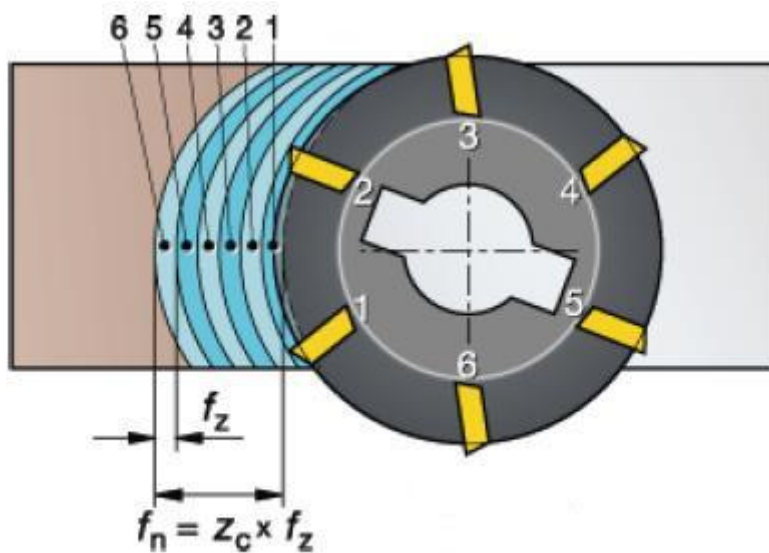


4. ábra. Forgácsív horonymarás esetén [7]

A fogásból való kilépés a legérzékenyebb a három fogácsolási fázis közül. Kerülni kell a forgácsképződést kilépéskor. Csökken az éltartam, ha vastag forgácsok jönnek létre kilépéskor, ugyanis a fogás végső pontján a forgács nincs megtámasztva, és megpróbál elhajlani. Keményfém szerszámoknál az ilyenkor ébredő mechanikai feszültség fokozottan káros.

2. A FORGÁCSKERESZTMETSZET MEGHATÁROZÁSA

A forgács alakulását több tényező is befolyásolja, de a számítások során csak a fogankénti előtolást, főorsó fordulatszámát és a működő fogszámot tekintem befolyásoló tényezőnek.



5. ábra
Homlokmarás [7]

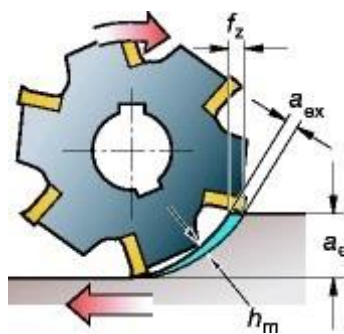
Az f_z fogankénti előtolás számításához szükségünk van a hosszanti előtolás értékére. A fogankénti előtolás meghatározásához, számításba kell vennünk az ajánlott maximális forgácsvastagság értéket.

Az ábrán is látható összefüggést átalakítva kapjuk az alábbi képletet:

$$f_z = \frac{V_f}{n z_c}, \quad (1)$$

ahol V_f a percnkénti előtolás (mm/percben), n az orsófordulatszama (ford/percben) és z_c pedig a fogak száma.

A maximális forgácsvastagságot a_{ex} -nek jelöljük általában. A marószerszám fogásvételének az eredménye ez az érték, ami az f_z , (a_e) és (k_r) értékektől függ. A fogankénti előtolás meghatározásánál fontos szempont a forgácsvastagság, annak érdekében, hogy a legnagyobb termelékenységet eredményező hosszanti előtolást lehessen alkalmazni.



6. ábra
Forgács paraméterek [7]

Az átlagos forgácsvastagságot, h_m -el jelöljük. A hasznos teljesítmény és a fajlagos forgácsolóerő számításához használjuk.

2.1. A legnagyobb forgácsvastagság

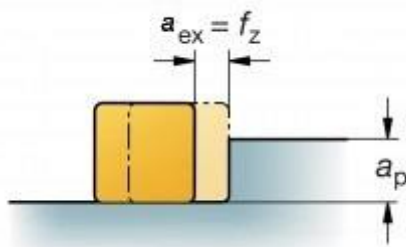
A marás legfontosabb paramétere. A megfelelő maximális forgácsvastagság ismerete nélkülözhetetlen megbízható és termelékeny marási műveletek tervezéséhez. Hatékony forgácsolás akkor valósítható meg, ha az a_{ex} értéket megfelelően igazítjuk a kiválasztott maróhoz. A túl kicsi a_{ex} értékű, tehát vékony forgács rossz

forgácsképződést, rövid éltartamot jelent. Az alacsony termelékenység és a rossz teljesítmény leggyakoribb oka a nem megfelelő a_{ex} -érték. Ha túl nagy a forgácsvastagság, akkor megterheli a forgácsolóélet, ami szerszámra káros.

A termelékenység növelésére nagyobb előtolást kell alkalmazni. A forgács vékonyodását elkerülendő, a fogankénti előtolás a következő esetekben növelhető:

- egyenes élű, 90° -nál kisebb belépési szögű marók esetében;
- kisebb fogásmélység esetén (a_p), általában kör- vagy nagy saroksugarú lapkák esetében;
- kisebb radiális fogásvételkor (D_e/a_e) arány, peremmarás esetében.

A $\phi 2$ -es ujjmaró 90° -os belépési szöggel rendelkezik. A maximális forgácsvastagság, egyenlő a fogankénti előtolással a 90 fokos marók esetében tehát $f_z = a_{ex}$.



7. ábra
Derékszögű él-elhelyezési szög [7]

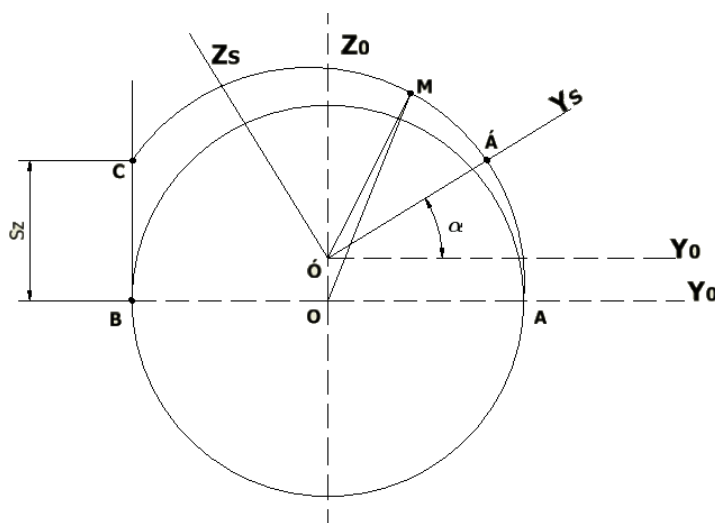
A forgácsvastagság a következő képlettel számolható:

$$h_{ex} = f_z \sin \kappa_r. \quad (2)$$

A belépési szög csökkentésekor növelni kell a fogankénti előtolást annak érdekében, hogy a forgácsvastagság (a_{ex}) ne változzon.

A vizsgált szerszám kétélű, és ebből adódóan 180° -os elfordulása alatt létrejövő forgácsot kell geometriai szempontból definiálni.

A $\phi 2$ mm átmérőjű ujjmaróra, átlagos táblázatos becslés alapján, $s_z = 0,03$ mm értékű fogankénti előtolást írunk elő.



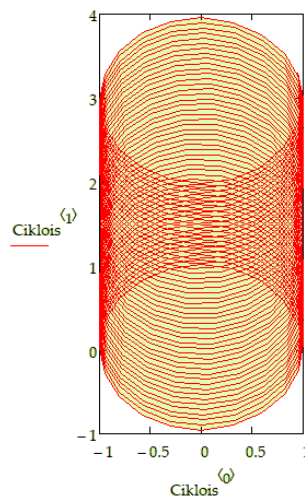
8. ábra
A forgácsvastagság változása az él helyzetével

A forgácsvastagság-függvény felírásához szükség van a maróél csúcsának pályaegyenleteire. Ezeket a 8. ábra alapján írjuk fel. Két koordináta-rendszert használunk: az $X_0Y_0Z_0$ koordináta-rendszer úgy van tájolva, hogy az X_0 tengely a maró tengelyével párhuzamos; a rendszer jobbsodrású. A maróhoz csatoljuk az $X_sY_sZ_s$ koordináta-rendszert, amely a forgácsba lépés pillanatában az $X_0Y_0Z_0$ -val egybeesik. Mivel a maró forog és közben az előtolás irányában elmozdul, ezért egy adott α elfordulási szögnek az OO' távolság felel meg

Következésképpen a 8. ábra alapján felírhatjuk az álló és a szerszámhoz csatolt mozgó rendszer közötti transzformációs mátrixot, ahol $S_1 = S_z Z$, az egyetlen fordulatra eső előtolás.

$$\begin{pmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & \frac{S_z Z}{2\pi} \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$OO' = \frac{S_z Z}{2\pi} \alpha \quad (4)$$



9. ábra

A szerszámél csúcspontjának pályája

Az A pont koordinátái a szerszám rendszerében a következők: $(0, R, 0)$

A pálya egyenletei, a (3) mátrix segítségével a következők:

$$\begin{cases} X_o(\alpha) = 0 \\ Y_o(\alpha) = Y_s \cos \alpha - Z_s \sin \alpha = R \cos \alpha \\ Z_o(\alpha) = R \sin \alpha + \frac{S_z Z}{2\pi} \alpha \end{cases} \quad (5)$$

A Mathcad programcsomag segítségével kiszámított hurkolt ciklois pálya a 9. ábrán látható.

A forgácsban töltött idő alatt, az élcsúspont távolsága az O origótól a következő lesz:

$$OM = \sqrt{Y_o^2(\alpha) + Z_o^2(\alpha)} \quad (6)$$

A számítások elvégzése után kapjuk, hogy

$$OM(\alpha) = \sqrt{R^2 + \frac{S_z^2 Z^2}{4\pi^2} \alpha^2 + 2R \frac{S_z Z}{2\pi} \alpha \sin \alpha} \quad (19)$$

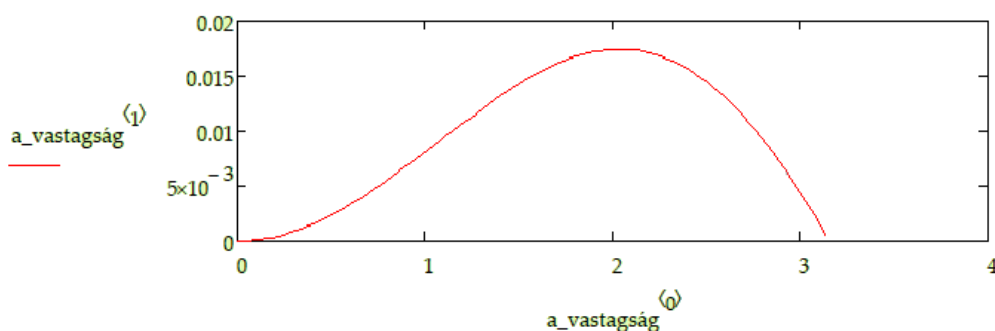
A forgácsvastagságot a kör sugárirányában mérjük, tehát a hurkolt ciklois polársugara és a maró sugárának különbségeként írható fel:

$$a(\alpha) = \sqrt{R^2 + \frac{S_z^2 Z^2}{4\pi^2} \alpha^2 + 2R \frac{S_z Z}{2\pi} \alpha \sin \alpha} - R \quad (7)$$

A vastagság maximumát a $\frac{da(\alpha)}{d\alpha} = 0$ egyenletből számítjuk. Az egyszerűsítések után az alábbi transzcendens trigonometriai egyenlethez jutunk:

$$\alpha \frac{S_z Z}{2\pi} + R \sin \alpha + R \cos \alpha = 0 \quad (8)$$

A forgácsvastagság változását az 10. ábra szemlélteti.



10. ábra
Forgácsvastagság függvénye/módosulása

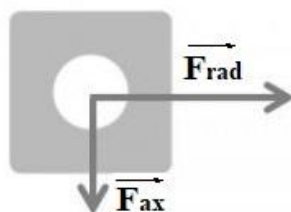
A kapott eredmények azt igazolják, hogy a legnagyobb forgácsvastagságot a fogankénti előtolás és a szerszám átmérője befolyásolja. Ezek függvényében változik a legnagyobb vastagság helyét meghatározó elfordulási szög-érték is. A választott forgácsolási paramétereknek megfelelő maximális forgácsvastagság $a_{max} = 0.017$ mm.

A tanulmányozott szerszám két élű. Ez esetben a maximális forgácsvastagság horonymaráskor $\alpha = 116^{\circ}65'$ -értékre keletkezik.

2. REZGÉSEK TANULMÁNYOZÁSA HORONYMARÁSKOR

A rezgések tanulmányozásához ismernünk kell a forgácsoló erőket. Homlokmarás esetén a forgácsoló-erők irányai befolyásolják a rezgéseket. A 90° -os ujjmarónál a domináns erők radiális irányban fejtik ki a hatásukat. Emiatt az ujjmaró nagy szabadhossz esetén elhajlik. Vékony falú alkatrészek megmunkálásakor lényeges, hogy forgácsoláskor a kis értékű axiális erők keletkezzenek, illetve ezeket minél kisebb értéken tartjuk.

Homlokmaráskor a rezgések csökkenthetők, ha ritka fogosztású ujjmarót alkalmazunk. A forgácsoló-erők csökkenthetők akkor is, ha kisebb fogásmélységet (a_p) alkalmazunk. Olyan felületeken, amelyek rögzítése nem elég merev, instabil lehet a forgácsolási folyamat. A szármaróban ébredő, rezgésgerjesztő forgácsolási erőösszetevők a 11. ábrán láthatók.

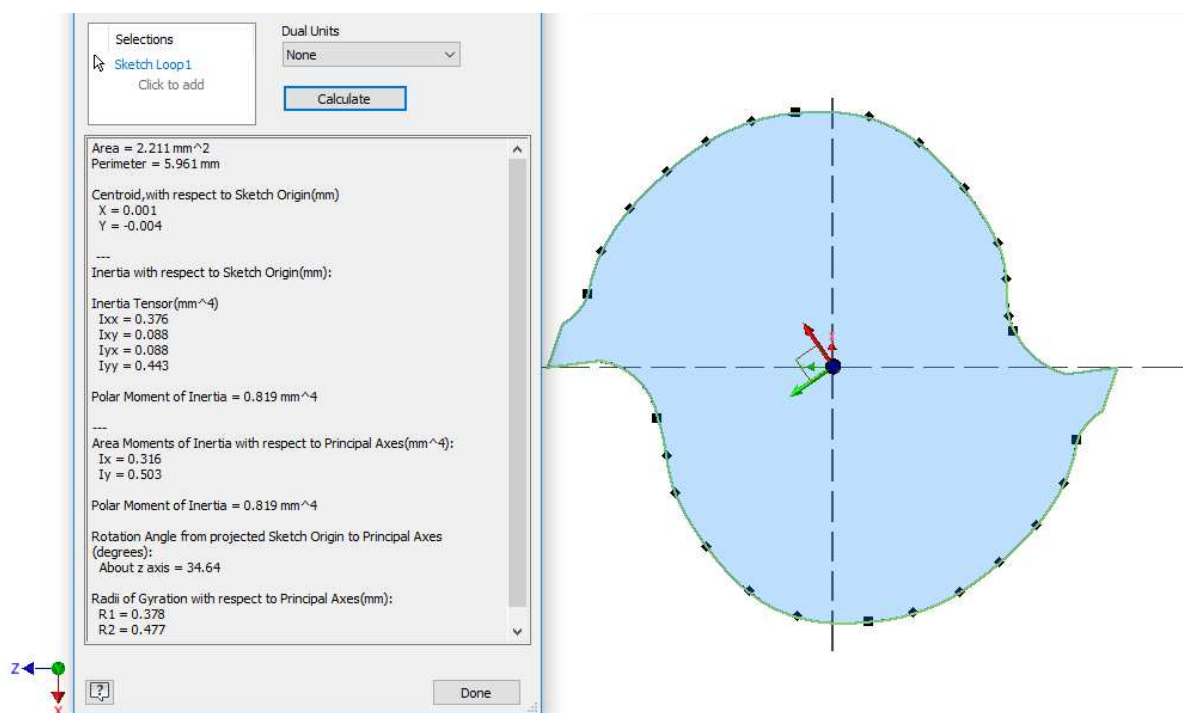


11. ábra
Forgácsolóerők iránya 90°-os ujjmarónál [7]

A szabadméret hossza befolyásolja a rezgések amplitúdóját. A rezgések csökkenthetők, ha lehetőleg rövidebb szabadmérettel rendelkező szerszámmal forgácsolunk. A megfelelő rögzítés biztosításához az ajánlott befogási hossz 4-szer nagyobb kell legyen, mint a forgácsoló átmérő. A nem megfelelő támasztás, gyenge befogás nem kívánt rezgéseket gerjeszt a szerszámban.

A viszonylag nagy szerszámkinyúlás okozta rezgések csökkenthetők, ha növeljük a fogankénti előtolást.

A tanulmányban szereplő ujjmaró keresztmetszetét és ennek geometriai tehetetlenségi nyomatékát Autodesk Inventor környezetben határoztam meg. Az 12. ábrán látható az ujjmaró keresztmetszet-vázlata. A tehetetlenségi nyomatékok x tengelyre $I_x = 0,316 \text{ mm}^4$.



12. ábra
Ujjmaró sematikus rajza

Feltevésém szerint, a rezgések elsődleges és legfontosabb forrása a forgácsvastagság változása miatt kialakuló, ciklikusan változó forgácsoló erő. A forgácsoló erőket a forgácsvastagság függvény (7) képlet alapján számítom.

A számításokat a fajlagos egységnyi forgácsoló erő kiválasztásával indítom; sárgaréz anyagminőség esetében ennek értéke $500\text{-}700 \text{ N/mm}^2$.

A számításokban, a továbbiakban a $k_{s1,1} = 500 \text{ N/mm}^2$ értéket tekintjük.

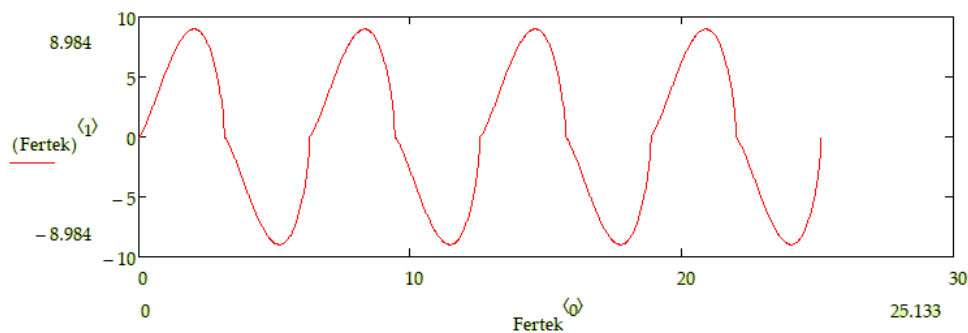
Az alkalmazott fogásmélység 0.5 mm , vagyis az átmérő 25% -a.

A forgácsoló erő egyszerűsített képlete a következő [11]

$$F_{forg} = k_{s1,1} a^{-z} \cdot A, \quad (9)$$

ahol A = a leválasztásra kerülő forgács keresztmetszete (mm^2), z pedig a forgácsvastagságot figyelembe vevő kitevő, melynek értéke $0,25 \div 0,35$.

A forgácsoló él váltakozva választják le a forgácsot. Ennek következtében a szerszámot meghajlító erő iránya változik. A változás leírására szükséges tudnunk, hogy a szerszám abszolút, azaz $2k\pi + \theta$, $\theta \in [0, 2\pi]$ elfordulási szögére melyik él lesz aktív, az első vagy a második. Úgy tekintjük, hogy 0 -tól π -ig az egyes él, π -tól 2π -ig a kettes fog vágni. Az erő változását a $0 \div 8\pi$ intervallumon a 13. ábrán szemléltettük:



13. ábra

A forgács vastagság változás alapján becsült forgácsoló erő változása a szerszámon

A függvény alakjából észrevehető, hogy periodikus, de nem harmonikus. Ezért szükséges ezt Fourier-sorba fejteni. A számításokat Mathcad 15.0 környezetben végeztem el. Az a_0 együtthatót elhanyagoltam, mert értéke nagyon kicsi, azaz 10^{-15} nagyságrendű.

A kiszámított együtthatók értékei az 14. ábrán láthatók. Az első oszlopban az a_n értékek szerepelnek, másodikban pedig a b_n értékei, ahol a jelölések az

$$f(x) = a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} a_n \cos i x + \sum_{i=1}^{\infty} b_n \sin i x \quad (10)$$

felírásnak megfelelők. Ezután meghatároztam a közelítő függvényt, ahol az elfordulási szög lesz a függvény változója, ő maga pedig véges számú harmonikusok összege.

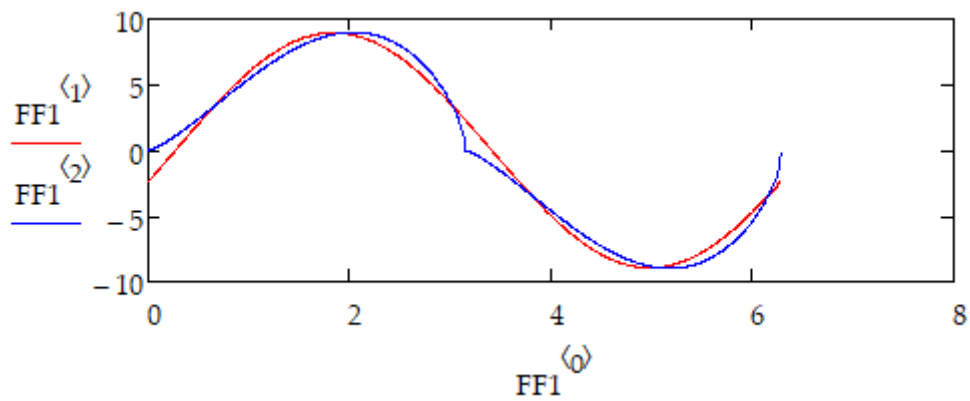
	0	1
0	-2.377	8.628
1	$-2.827 \cdot 10^{-15}$	0
2	0.61	0.657
3	$5.314 \cdot 10^{-15}$	$-6.361 \cdot 10^{-15}$
4	0.306	0.286
5	$-3.039 \cdot 10^{-15}$	$-1.908 \cdot 10^{-15}$
6	0.186	0.17
7	$-4.316 \cdot 10^{-15}$	0
8	0.126	0.117
9	$-2.827 \cdot 10^{-15}$	$2.679 \cdot 10^{-8}$

Cf =

14. ábra

A Fourier-sorozat első 10 tag meghatározása

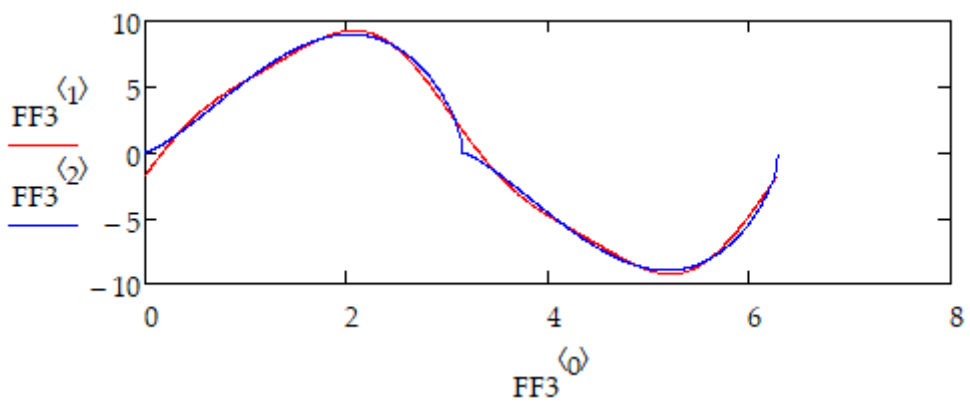
A 15. ábrán az első harmonikus és az eredeti függvény összehasonlító ábrázolását láthatjuk. Észre lehet venni, hogy az eredeti függvény töréspontját az első harmonikus nem tudja követni.



15. ábra

Az első harmonikus és az eredeti függvény reciprok helyzete

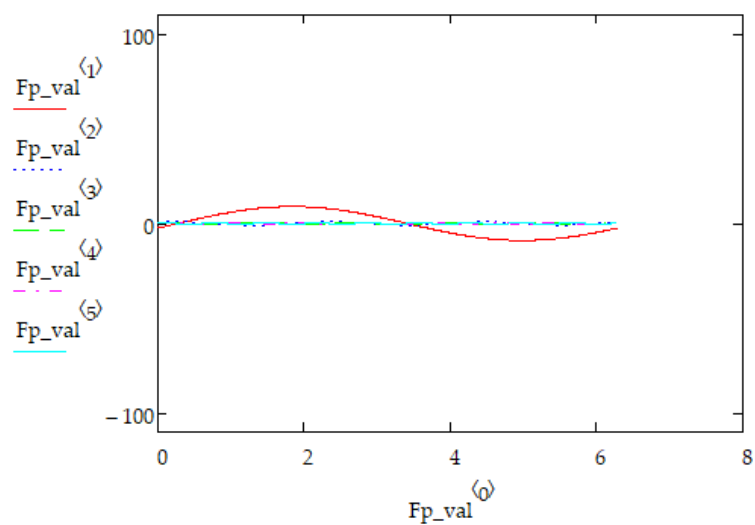
Ha viszont az első négy taggal számolok akkor sem lesz jobb, de ha az első hat tagot tekintem, akkor jobb közelítéseket kapok. A Fourier sorozatból származtatott függvény egyre jobban simul az eredeti függvényre.



16. ábra

Az első 6 harmonikust tartalmazó Fourier-közelítés és az eredeti függvény

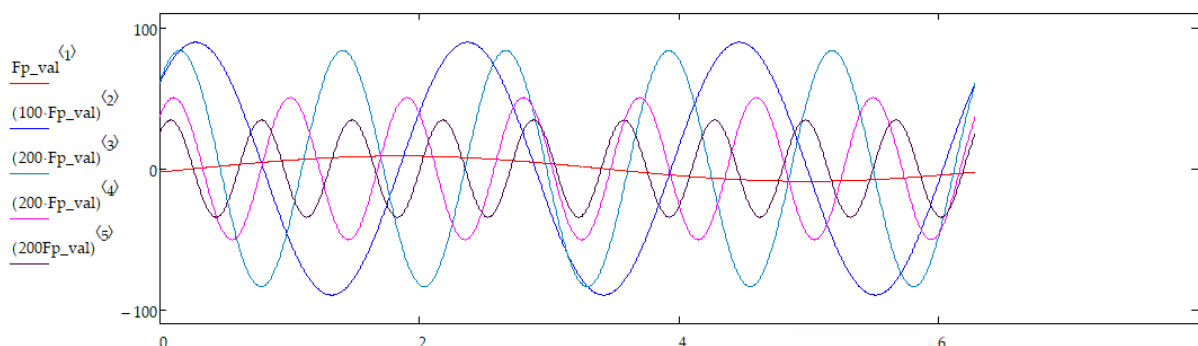
Az egyes harmonikusok értékeit a 17. ábra szemlélteti.



17. ábra

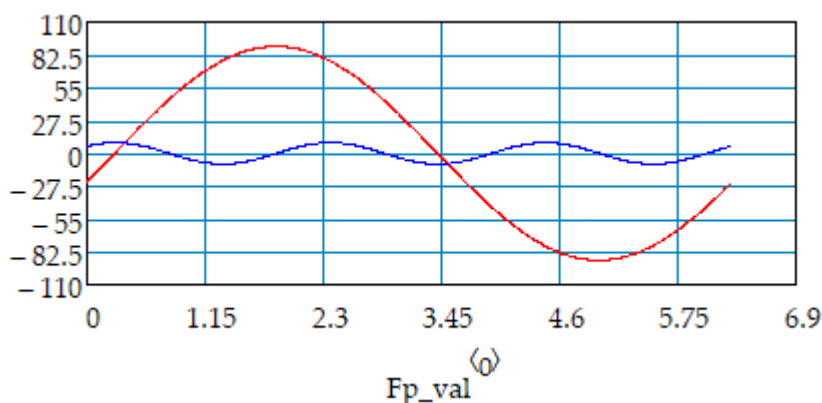
Az egyes harmonikusok szuperponált ábrázolása

Annak érdekében, hogy vizuálisan értelmezhetővé tegyük a különböző harmonikusokat, az amplitúdókat jól megválasztott faktorokkal szorozzuk (18. ábra):

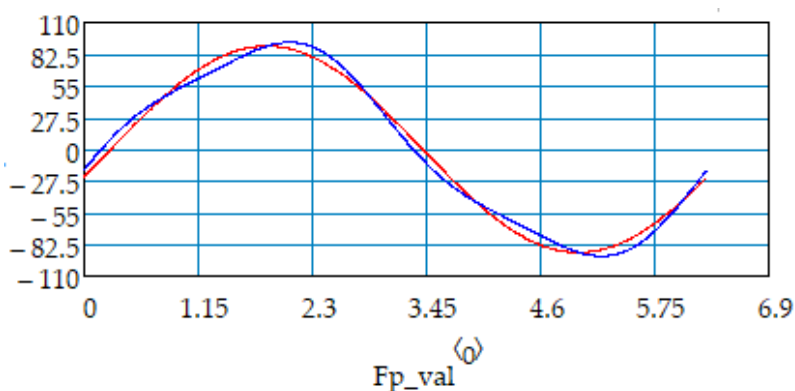


18. ábra
Fourier sorok tagjai szuperponációban

Jelen feladatban a függvénynek csak az első és harmadik tagjával való közelítés elegendő



19. ábra
Az első és harmadik harmonikus



20. ábra
Eredeti és a közelítő függvény relatív helyzete

A 20. ábrán a harmonikus sorral való közelítést (kék színű görbe) és az első harmonikust (piros színű görbe) szemléltetjük. Észre lehet venni, hogy a közelítés jól követi az eredeti függvényt.

Ezután átírjuk a változókat időre, hogy a rezgési egyenletek felírásához a szögváltozót időváltozóra cseréljük, a $\varphi(t) = \omega_0 t$ lineáris transzformáció bevezetésével, ahol $\omega_0 = \pi n/30$, a gerjesztési körfrekvencia

Továbbá szükséges a maró konzolban levő részének tömege. Ezt közelítéssel számítjuk, a keresztmetszetről. A 12. ábra alapján a szerszám keresztmetszete a teljes $\phi 2$ mm átmérőjű körnek közelítőleg 70%-a, ezenfelül a szárból kb. 2 mm tömör, horonymentes hengerrész.

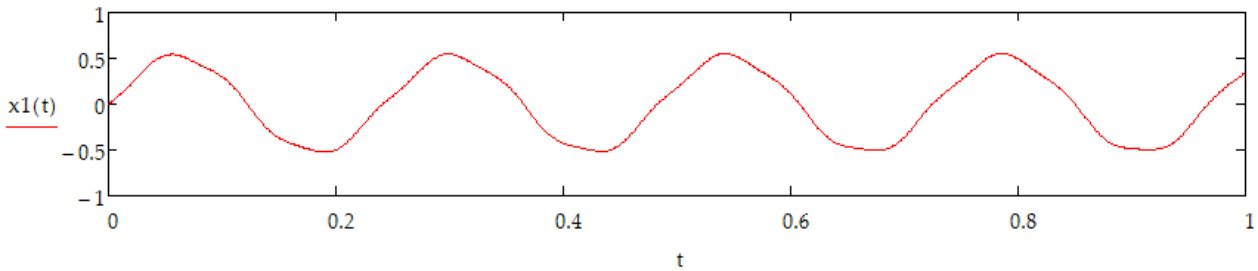
A differenciálegyenletet, az egy szabadságfokú modell alapján [1] írjuk fel:

$$\ddot{x} + 2 \frac{c}{2m} \dot{x} + kx = F_f(t). \quad (11)$$

Csillapítási tényezőnek $c = 10^{-5} \text{N} \frac{\text{s}}{\text{mm}}$ értéket vettem.

A k merevséget a konzolba rögzített maró deformációjának mértékéből számítottam.

A differenciálegyenletet a Mathcad 15.0 szoftver használatával, az Adams-féle módszer alkalmazásával oldtam meg. Ennek alapján, meg kapjuk a következő grafikus képet (21. ábra):

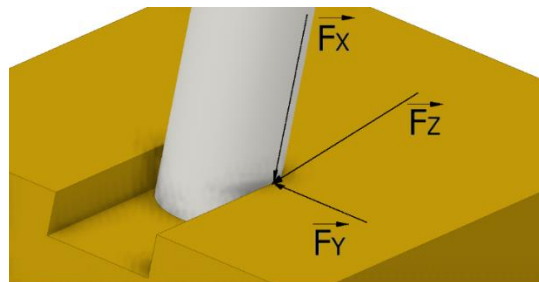


21. ábra

Első modell stacionáriuslengései

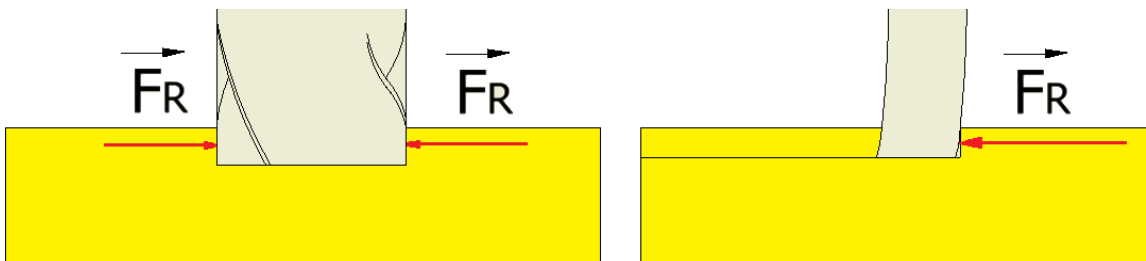
A 21. ábra alapján meg állapítható, hogy a szerszám kihajlása túlságosan nagy lesz. Az ujjmaró szára ilyen értékű kihajlás esetén eltörik. A felépített modell nem valóságos. Ennek az az oka, hogy ebben a feltevésben a maró homlokrésze szabadon marad. A valóságban viszont a szerszám meg van itt támasztva. A forgácsolt felület horony kialakítású, az ujjmaró így két oldalt is támasztva lesz. Az ujjmaró e miatt csak egy irányban képes kilengeni.

Az új erőmodellbe beleszámítottam a kilengés korlátait is. A marónak az alsó része, tehát a két keresztletet tartalmazó része nem tud elmozdulni mert részben a horony falai támasztják, részben pedig a kihajlás elhanyagolható abban az irányban.



22. ábra

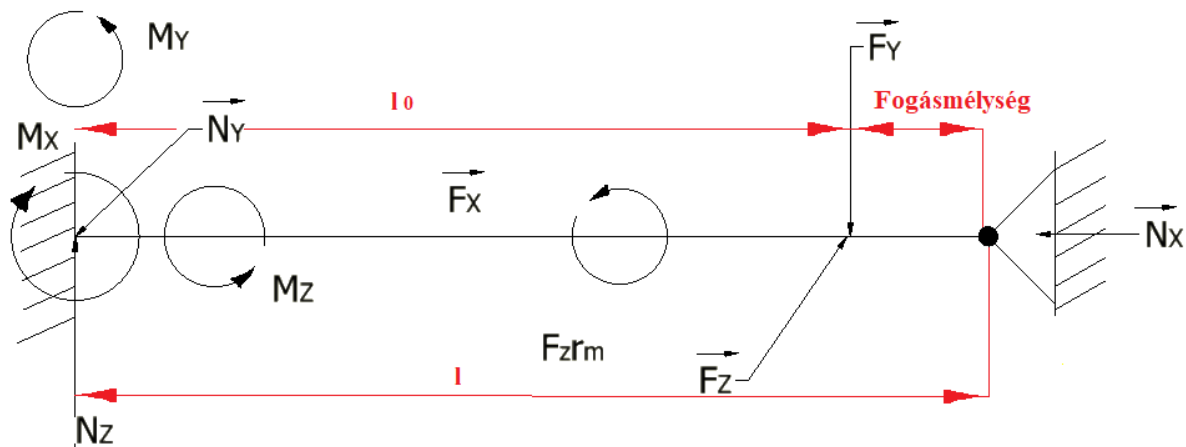
Erők irányai homlokmarás esetén



23. ábra

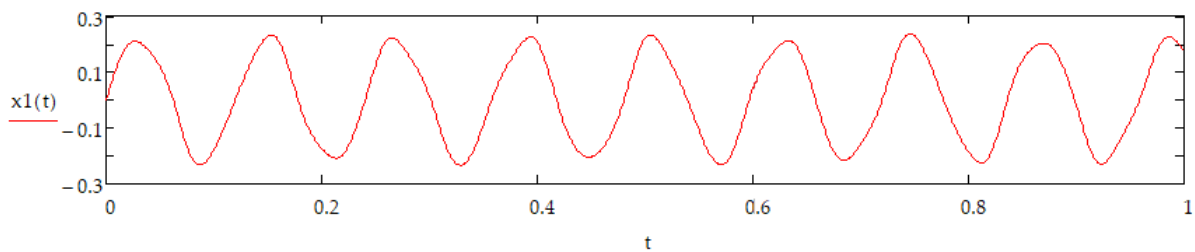
A kényszererők irányai

Jó közelítést kapunk, ha a maró fogait tartalmazó homloksíkot csuklóval helyettesítjük, amelyben az elmozdulást lenullázzuk. A feladatot a Castigliano féle tétel [1] alkalmazásával oldjuk meg. A forgácsoló erővektorokat pedig a kezdeti felület, vagyis a mart horony tetejére illesztjük. Az új erőmodellt a 24. ábrán tüntettük fel.

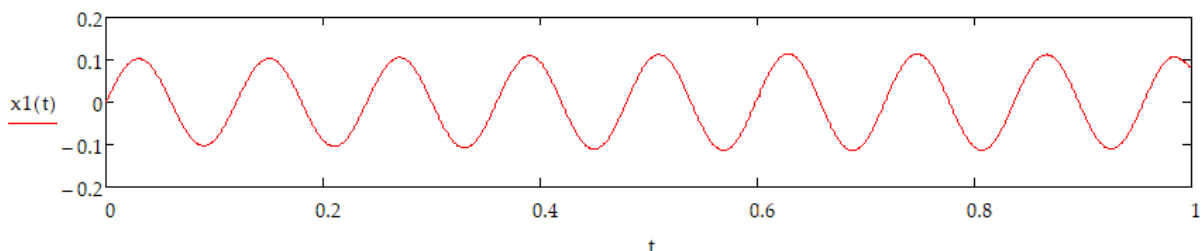


24. ábra
A maró rögzítési és erőmodellje

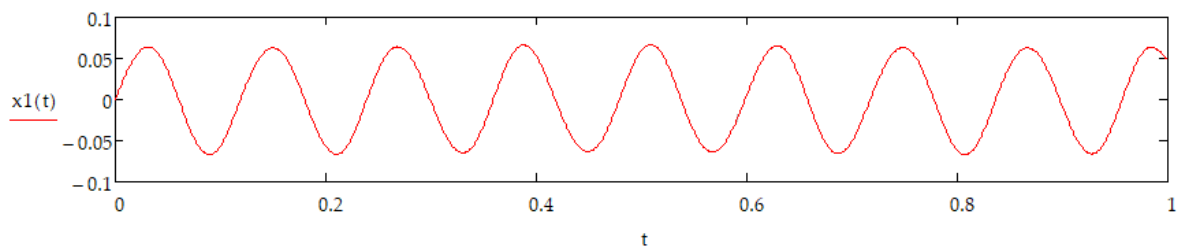
Az új modellre számított válaszfüggvény szerint, hogy sokkal kisebb lesz az amplitúdó, de még mindig elfogadhatatlanul nagy. A forgácsolási paraméterek vizsgálata rávilágít arra, hogy a választott forgácsoló sebesség-érték elég alacsony. Észre lehet venni, hogy a forgácsolási sebesség növelésével a rezgések amplitúdóit hatékonyan csökkenteni tudjuk. A rezgések amplitúdói még csökkenthetőek, ha kisebb fogásmélységet választunk.



25. ábra
Második modell szerinti válasz 30 m/perc forgácsolási sebességre

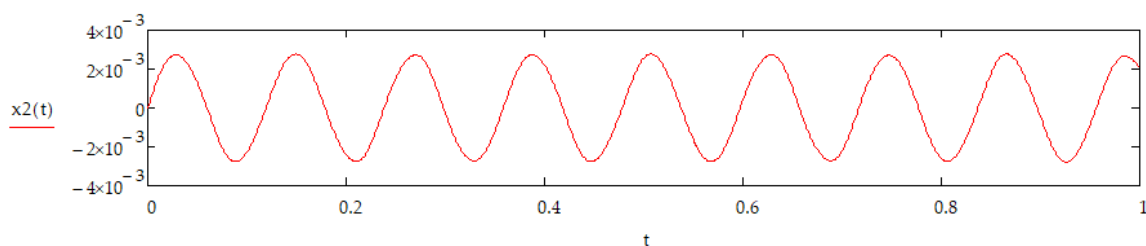


26. ábra
Második modell válasza 60 m/perc forgácsolási sebességre

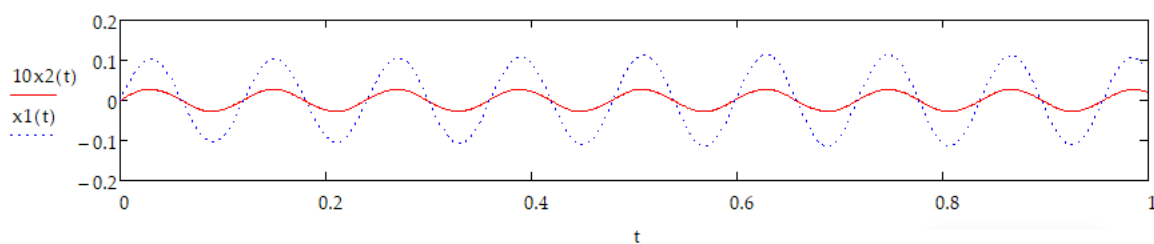
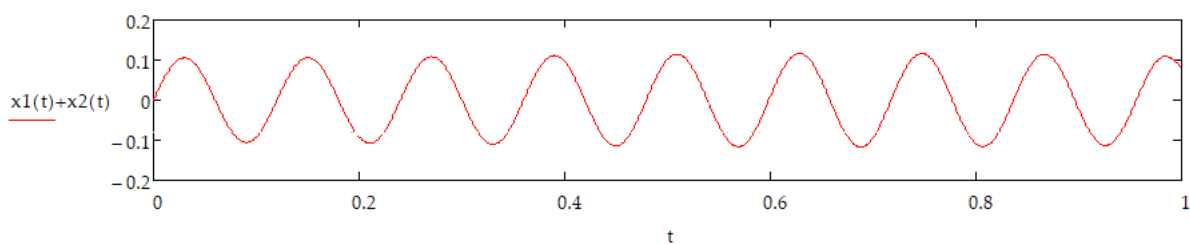


27. ábra
Második modell 100 m/perc forgácsolási sebességre

A második harmonikust hasonlóképpen értékeljük ki.



28. ábra
Második harmonikus kiértékelése



29. ábra
A végleges modell eredményei

KÖVEKTEZTETÉSEK

Nem robusztus technológiai rendszerek esetében nagy fontosságot kell tulajdonítani a rezgés források azonosításának, és a rezgések modellezésének, az amplitúdók helyes becslése céljából.

Dolgozatunkban bemutattuk, hogy mennyire fontos a helyes modell alkalmazása és a megfelelő forgácsolási sebesség, illetve fordulatszám kiválasztása.

A bemutatott modell koránt sem teljes, még lehet változtatni és javítani rajta azáltal, hogy a marót nem egy szabadságfokú, hanem folytonos környezetnek tekintjük. Itt viszont negyedfokú differenciálegyenleteket kell alkalmazni.

IRODALOMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Alămoreanu, E., Dinu, G., Stoica, M., ș.s. *Rezistența materialelor*, Universitatea Politehnica București, Matrix Rom
- [2] Picoș, C., Coman, Gh., Pruteanu, O., Bohosievici, C., Braha, V., Dr.Paraschiv, Slătineanu, L., Grănescu, Tr., ș.a. *Proiectarea tehnologiilor de prelucrare mecanică prin așchiere*, Editura Universitas Chisinău, **1992**
- [3] Hollanda, D ., *A forgácsolás alapjai*, Scientia Kiadó, Kolozsvár, **2008**
- [4] Dr. Árva, J., Dr. Nagy, P.S., *Forgácsoló eljárások fehér*, Műszaki kiadó, Budapest, **2013** képek
- [5] Bálint, L., *A forgácsoló megmunkálás tervezése*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, **1958**
- [6] Conf. dr. ing. Enache, Ș., *Proiectarea si tehnologia sculelor așchietoare*, Editura didactică si pedagogică, București, **1973**
- [7] <https://www.sandvik.coromant.com/hu-hu/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx>
- [8] <https://www.iscar.com/Products.aspx/CountryId/1/ProductId/3531>
- [8] http://www.mitsubishicarbide.com/en/technical_information/tec_rotating_tools/tec_solid_end_mills/tec_solid_end_mills_technical/tec_solid_end_mills_terminology
- [10] http://www.gjt.bme.hu/sites/default/files/03_Elgeometria.pdf
- [9] <https://www.uni-miskolc.hu/~wwwfemsz/forg1.htm>

Fogasléc és kúpfogaskerék kapcsolódásának lehetőségei

Rack and Belvel Gear Coupling possibilities

SIPOS Bence

siposbence93@gmail.com

Sapientia EMTE, Marosvásárhely Műszaki és Humán Tudományok Kar

Vezető tanára: Dr. MÁTÉ Márton

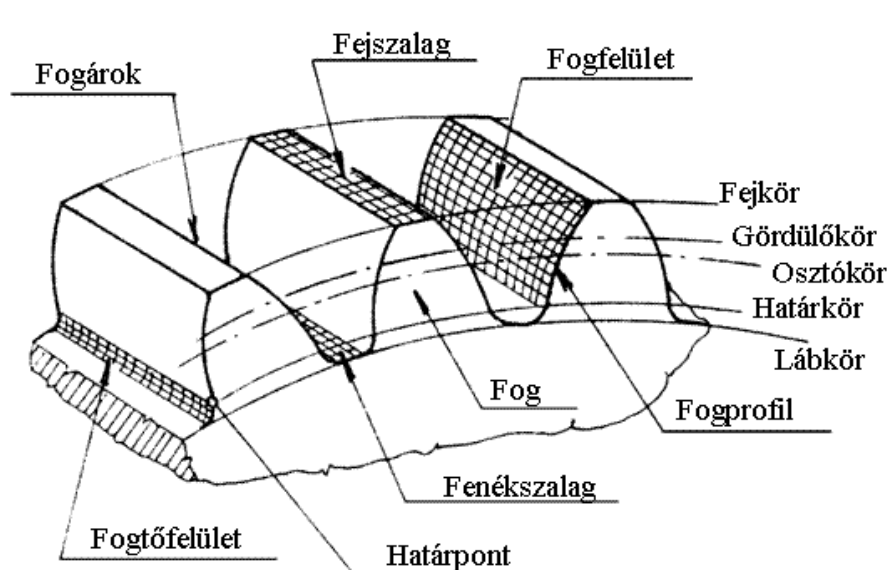
Kivonat

Jelen közleményben a hengeres és kúpfogaskerekek kapcsolódásának különböző lehetőségeit vizsgálom. Szimuláció segítségével szemléltetem egy szabványos lécszerű szerszám csonka kúpba, azaz tányérkerékbe vágott fog profilját. Egyenes fogazású fogaslécet használok a kúp fogaskerék lefejtésére. Az így létrejött kúp-fogaskerék kapcsolható lesz az ugyanezzel a szerszámmal lefejtett hengeres fogaskerékkel. A modellezés Autocad környezetben készült, a vezérlőprogramot AutoLISP nyelven írtam meg. A program bemenő adatai a modul, a fogszám és a fogszélesség. Ezen adatok alapján generál egy fogaslécet és egy csonkakúpot, majd elvégzi a lefejtést. Így sikerül szemléltetnem 3D-ben a kúpfogaskeréken létrejött fogprofil.

Kulcsszavak: fogasléc, kúpkerék, szimuláció, alámetszés, fogkihegyesedés

Alapfogalmak

A klasszikus evolvens hengeres fogazat főbb geometriai elemeit az 1. ábrán szemléltetjük. Az egyes geometriai elemek elkülönítik a fogazat működő részét a fogazat határoló részeitől. Jelen esetben a fogfelület – a fog azon része, ahol a hajtó és hajtott kerék érintkezik – az aktív rész: ezt a határkör és a fejkör határolja. A fogaskerék helyes kapcsolása szempontjából igen fontos a fogfej határfelülete, illetve a fogláb felülete. A fogaskerék működés közbeni elkerülhetetlen deformációja következtében a valós kapcsolódó felületek torzulnak, emiatt különleges megmunkálási technológiák beiktatása szükséges. A deformáció mértéke azonban oly kevés, hogy a számításokat az elméleti fogalakkal végezzük.



1. ábra. Evolvens hengeres fogazat főbb geometriai elemei [1]

Két fogaskerék közti kapcsolást a legtöbb esetben úgy kell megvalósítani, hogy ha a hajtó kerék állandó szögsebességgel forog, akkor a hajtott kerék szögsebessége is állandó legyen. Ez a feltétel alapján a szögsebességek aránya is állandó lesz:

$$i_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \text{áll.} \quad (1)$$

Ha $i < 1$ akkor gyorsító, ha $i > 1$ akkor lassító áttételről van szó.

1. A fogatlefejtés jellegzetességei

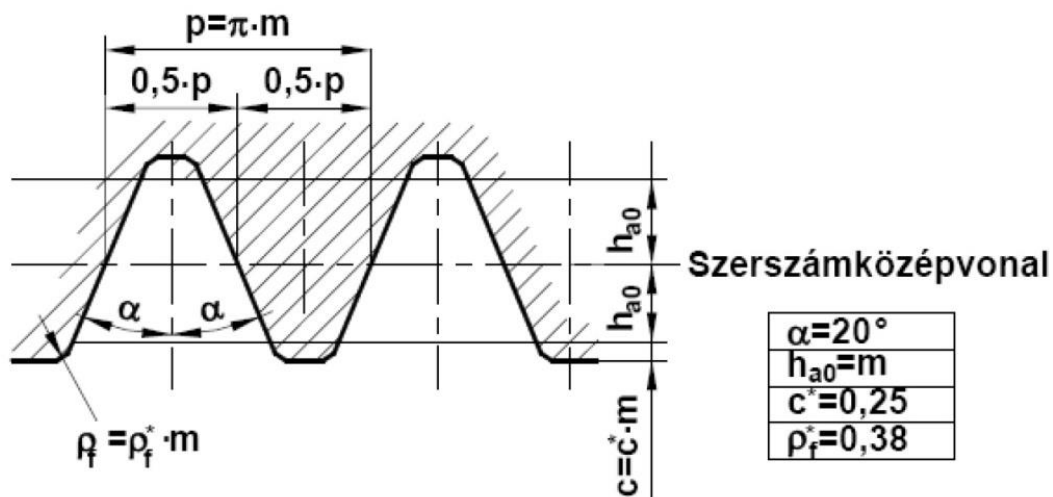
A fogatlefejtés során olyan technológiai hajtópárt képezünk, amelynek egyik eleme a szerszám, vagy az általa megvalósított elem, a másik pedig a fogazandó alkatrész

1.1. A lefejtő elem

A klasszikus evolvens hengeres hajtások lefejtő eleme a fogasléc. A fogasléc egy fogazott rúd, amely a fogaskerék egy speciális formájaként is felfogható, mint annak a fogaskeréknek egy véges hosszúságú szakasza, amelynek gördülőkörének sugara és fogainak száma végtelen.

Az evolvens fogprofilú fogaskereket szabványos fogasléccel generáljuk. Ha a szerszám osztóvonalát csúszásmentesen legördítjük a gyártandó kerék osztóköreán, akkor a fogasléc profilja által létrehozott görbesereg burkolójaként tekinthető az evolvens fogprofil.

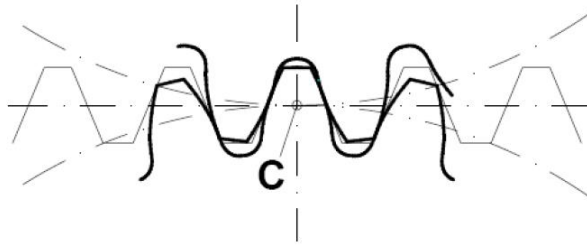
A 2-es ábrán a Maag-féle léccel alakú szerszám alapprofilját szemléltetjük



2. ábra. Maag-féle léccel alakú szerszám alapprofilja

Az egyenes profilú fogasléc lényeges eleme az α profilszög, amely a trapéz nem párhuzamos oldala és a szimmetriatengelye által bezárt szög. Evolvens fogat lefejtése esetében a kapcsolóvonal mindig merőleges a közös érintőkre, a fogaskerék és a léccel kapcsolódási szöge állandó. Kizárólag az azonos profilú léccel által generált fogaskerekek képesek egymással helyesen kapcsolódni. Ez esetben a két egyidőben kapcsolódó kerekek kapcsolódó lécei sablon-ellensablon kapcsolatban állnak [3] léccel úgy kapcsol, mint profil és ellenprofil. A Maag típusú egyenes profilú léccel hatalmas előnye a két léccel egyenes profilból következő azonosságában rejlik. Bármely más, az evolvensstől eltérő típusú fogat esetében a kapcsolódó fogatok előállítására két különböző szerszám szükséges, míg az evolvenskerekek lefejtésére egyetlen léccel típusú szerszám elegendő.

Jelen közleményben egy kúpkerék forgó mozgását hangoljuk össze a léccel elmozdulásával.



3. ábra. Azonos profilú lécszerszám által generált fogaskerekek kapcsolása

1.2. A hengeres-kúpos hajtás kúpkerékének lefejtése

A szakirodalomban a hengeres-kúpos hajtást igen elterjedten használják finommechanikában, könnyűiparban és ott, ahol kis térfogat mellett nagy nyomotékátvitel szükséges. Ilyen eset a helikopterek rotor tengelyének meghajtása is [3]. Az irodalomban fellelhető kutatások a hengeres-kúpos hajtás lefejtését *metszőkerékkel*, azaz kerék típusú szerszámmal tárgyalják. [1]. F. L. Litvin két jelentős hátrányát említi meg ennek a hajtástípusnak. Leírja, hogy a kerekek gyártásához nagy készletre van szükség metszőkerekekből, és a kerék fogainak hosszúsága korlátozott a fogak alámetszése és kihegyesedése miatt.

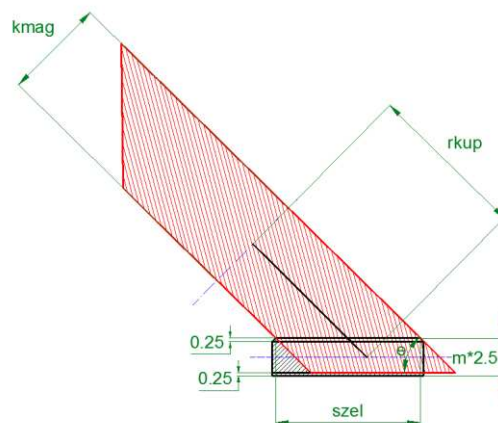
Figyelembe véve, hogy a léctípusú szerszámok esetében (csigamaró) a forgácsolás hatékonysága nagyobb, célszerűnek találom először a léccel való lefejtés tanulmányozását. A léc-kúpkerék kapcsolódásának elvi vázlata a 4-es ábrán látható. A hajtás gördülő elemei a léc osztósíkja és az kerék osztókúpja. A hengeres fogaskerekekkel ellentétben jelen hajtás esetében, az osztósík és az osztókúp csúsztatva gördülnek le egymáson. Az osztókúpon létezik egyetlen kör, amely a léc osztósíkján csúszásmentesen gördül le: ez lesz a kúpkerék gördülőköre, melyet az evolvens kerekek osztókörének képletével számolunk:

$$r_{kup} = \frac{z \cdot p}{2 \cdot \pi} \quad (2)$$

A fogmagasságot a generátorra merőlegesen határozzuk meg. A hengeres-kúpos hajtás állandó fogmagasságú tehát a láb kúp, a fejkúp és az osztókúp generátorai párhuzamosak.

A fogsléccet a léc határvonaláig, azaz 2.25 modul mélységbe süllyesztem bele a csonkakúpba. Ismertnek tekintjük a szerszám-léc modulját (m), szélességét ($s_{zél}$), a kívánt fogszámot (z), és a kúp palástja és az alapkör által bezárt szöget (θ). Ezen paraméterekkel kiszámolom a csonkakúp paramétereit.

A gördülőkör helyzete a fogszélesség-szakaszhoz viszonyítva elméletileg végtelen beállítást enged meg. Ez lehetővé tesz egy, a klasszikus profileltolással geometriai szemszögből egyenértékű módosítást, amely szintén fogalak módosításhoz vezet. Ehhez hozzájárul a kapcsolódó fogaskerék saját profileltolása. A két módosítás lehetőséget ad az optimális kapcsolódás feltételeinek megteremtésére.



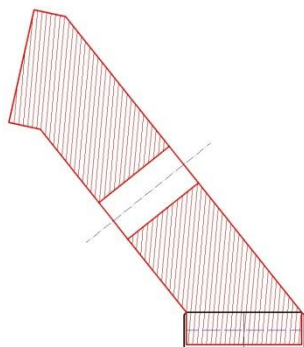
4. ábra. Lécc-kúpkerék kapcsolódásának elvi vázlata

A kúp magasságát k_{mag} -al jelölöm. Értékét a léc szélességnek és a θ szögnek ismeretében a :

$$k_{mag} = szel \cdot \sin \theta \quad (3)$$

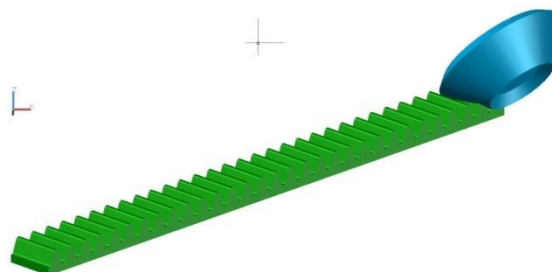
összefüggéssel számítom.

A kapott értékekkel kiszámíthatók a tányérkerék (kúpkerék) előgyártmányának jellegzetes méretei, amelyek a szimuláció elvégzéséhez szükségesek.



5. ábra

Léc-tányérkerék kapcsolódásának elvi vázlatja



6. ábra

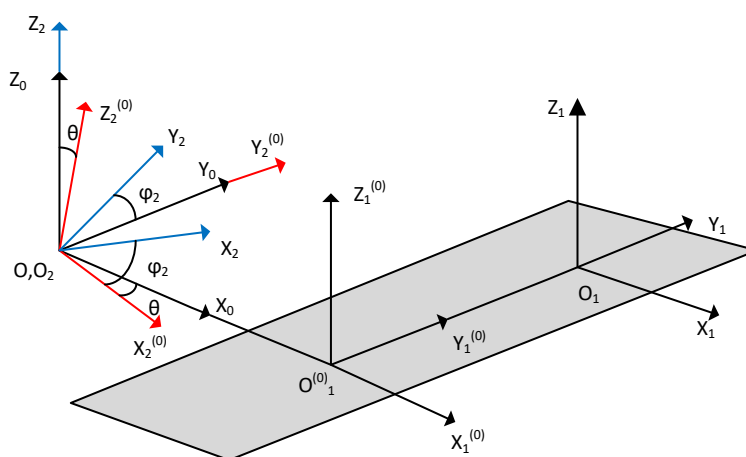
Léc-tányérkerék kapcsolódásának testmodellje

A tányérkereket a fogaslécen az előbbieken kifejtett módon legördítve kapjuk meg a kívánt fogprofil. A módszer bármilyen hengeres kerékekkel kapcsolódó kúpfogaskerékre alkalmazható.

3. A léc-kúpkerék kapcsolódási egyenlete

A kapcsolódási egyenletet a fogasléchez kapcsolt koordináta rendszerben írjuk föl. Az állványhoz kötött, a léchez kötött és a megmunkálendő kerékhez kötött S0, S1, illetve S2 derékszögű koordináta-rendszerek a 7. ábrán láthatók. A relatív sebesség a léc elmozdulási sebességéből és a fogazandó kerék saját tengelye körüli forgásából adódik. Az ábra alapján felírható, hogy:

$$\vec{v}_1^{(1)} = \omega_2 \cdot r_{d_2} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (4)$$



7. ábra. Az állványhoz, a léchez és a megmunkálendő kerékhez kötött derékszögű koordináta rendszerek

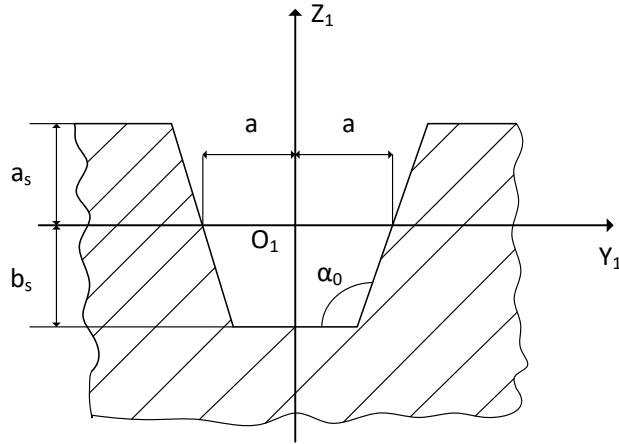
A kerékhez csatolt pont sebessége S1-ben a szögsebesség-vektor átviteli nyomatékának alkalmazásával a következő lesz:

$$\vec{v}_1^{(2)} = \vec{\omega}_{0_1}^{(2)} \times \vec{r}_1 + \vec{0_1 0_2} \times \vec{\omega}_{0_1}^{(2)}. \quad (5)$$

Kifejtett állapotban a relatív sebesség a következő lesz:

$$\vec{v}_1^{(12)} = \begin{pmatrix} (y_1 + r_{d_2} \cdot \varphi_2) \cdot \cos\theta \\ -x_1 \cdot \cos\theta + z_1 \cdot \sin\theta \\ -y_1 \cdot \sin\theta - r_{d_2} \cdot \varphi_2 \cdot \cos\theta \end{pmatrix}. \quad (6)$$

A normálvektorok felírása a 8-as ábra alapján azonnal adódik.



8. ábra. A fogasléc alaprofilja

$$\begin{cases} n_1^{(j)} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\cos\alpha_0 \\ \sin\alpha_0 \end{pmatrix} \\ n_1^{(b)} = \begin{pmatrix} 0 \\ \cos\alpha_0 \\ \sin\alpha_0 \end{pmatrix} \end{cases}. \quad (7)$$

Szintén a 8-as ábra alapján a generáló felületek egyenletei a következők:

$$\begin{cases} \Sigma_j \begin{cases} x_1 = u \\ y_1 = v \cdot \operatorname{tg}\alpha + a \\ z_1 = v \end{cases} \\ \Sigma_b \begin{cases} x_1 = u \\ y_1 = -a - v \cdot \operatorname{tg}\alpha \\ z_1 = v \end{cases} \end{cases}. \quad (8)$$

A műveletek elvégzése után megfigyelhető, hogy a kapcsolódási egyenletek lineárisak u , v és φ_2 paraméterekben:

$$\begin{cases} (u \cdot \cos\theta + v \cdot \sin\theta) \cdot (-\cos\alpha_0) + [-(v \cdot \operatorname{tg}\alpha_0 + a) \sin\theta - r_{d_2} \cdot \varphi_2 \cdot \cos\theta] \cdot \sin\alpha_0 = 0 \\ (-u \cdot \cos\theta + v \cdot \sin\theta) \cdot \cos\alpha_0 + [(a + v \cdot \operatorname{tg}\alpha_0) \cdot \sin\theta - r_{d_2} \cdot \varphi_2 \cdot \cos\theta] \cdot \sin\alpha_0 = 0 \end{cases}. \quad (9)$$

4. A származtató felületsereg mátrixos egyenletei

A származtató felületsereg mátrixos egyenletei a 7. ábra alapján felírható koordináta transzformációk alapján a következő lesz:

$$\underline{r}_2 = M_{22^0} M_{2^0 0} M_{01^0} M_{1^0 1} \underline{r}_1 \quad (10)$$

ahol:

$$M_{22^0} = \begin{pmatrix} \cos\varphi_2 & \sin\varphi_2 & 0 & 0 \\ -\sin\varphi_2 & \cos\varphi_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

$$M_{2^0 0} = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

$$M_{01^0} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{r_{d_2}}{\cos\theta} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

$$M_{1^0 1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & r_{d_2} \cdot \varphi_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

5. Az alámetszés analitikus vizsgálata

Ismert [3, 4, 5], hogy a burkoló felületen nem jelenik meg az alámetszés amennyiben a burkolt felületből kizárjuk azokat a pontokat, amelyekben a burkolt felülethez viszonyított relatív sebesség nulla. Az érintkezési pont abszolút sebessége:

$$\vec{v}_1^{(absz)} = \vec{v}_1^{(r1)} + \vec{v}_1^{(sz1)} = \vec{v}_1^{(r2)} + \vec{v}_1^{(sz2)} \quad (15)$$

ahonnan:

$$\vec{v}_1^{(r2)} = \vec{v}_1^{(12)} + \vec{v}_1^{(r1)}. \quad (16)$$

A származtató felülethez viszonyított relatív sebességek az (8). egyenletek u és v paramétere-kén keresztüli idő szerinti deriválásával állítjuk elő. A továbbiakban a relatív sebesség koordinátáit csak a jobb származtató felületre adjuk meg:

$$\vec{v}_{r1}^{(1)} = \begin{pmatrix} \frac{du}{dt} \\ tg\alpha \cdot \frac{dv}{dt} \\ \frac{dv}{dt} \end{pmatrix} \quad (17)$$

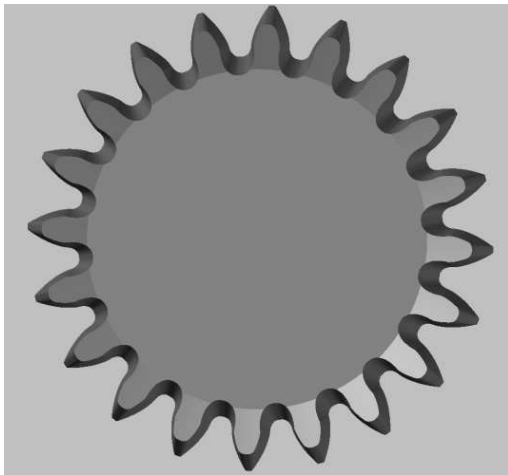
Felhasználva a kapcsolódási egyenlethez felírt relatív elmozdulási sebességet, ami nem más mint az érintkezési pont abszolút mozgásának különböző módon felírt szállítósebesség-összetevőinek különbsége, a kívánt feltétel a következő egyenletrendszerrel fejezhető ki:

$$\begin{cases} (v \cdot tg\alpha + a + r_{d_2} \cdot \varphi_2) \cdot \cos\theta = -\frac{du}{dt} \\ -u \cdot \cos\theta + v \cdot \sin\theta = -tg\alpha \cdot \frac{dv}{dt} \\ -(v \cdot tg\alpha + a) \cdot \sin\theta - r_{d_2} \cdot \varphi_2 \cdot \cos\theta = -\frac{dv}{dt} \end{cases}. \quad (18)$$

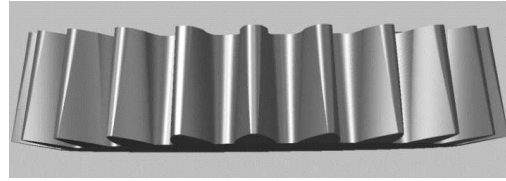
Ehhez az egyenlethez hozzácsatoljuk a (9). kapcsolódási egyenletek megfelelőjét. Észrevehető, hogy öt ismeretlenes, négy egyenletből álló lineáris egyenletrendszert kapunk $u, v, \varphi_2, \frac{dv}{dt}, \frac{du}{dt}$ ismeretlenekben. Kiejtve a három fölösleges paramétert u -ban és v -ben lineáris összefüggést kapunk. Ennek kifejtését jelen tanulmányban nem közöljük.

6. A fogak alámetszésének és kihegyesedésének tanulmányozása

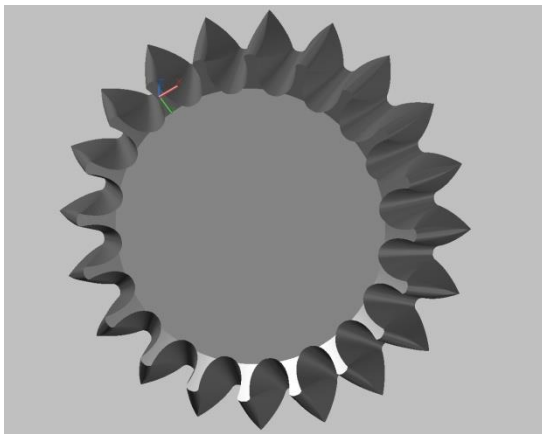
A jelen vizsgálatot különböző θ szögű, de ugyanakkora gördülőkörű kúpkerék lefejtésére irányítottam. A fogszám $z=20$ fog, a θ szög pedig rendre $75^\circ, 50^\circ$ és 30° . A szimuláció eredményeképpen kapott testmodellek a 9., 10., 11., 12. ábrákon láthatók. A θ szög csökkentésével, a fogak kihegyesednek és méretük is csökken, kisebb lesz az aktív fogfelület. A végeredményül kapott tányérkerék kapcsolható lesz egy ugyanilyen modulú hengeres fogaskerékkel.



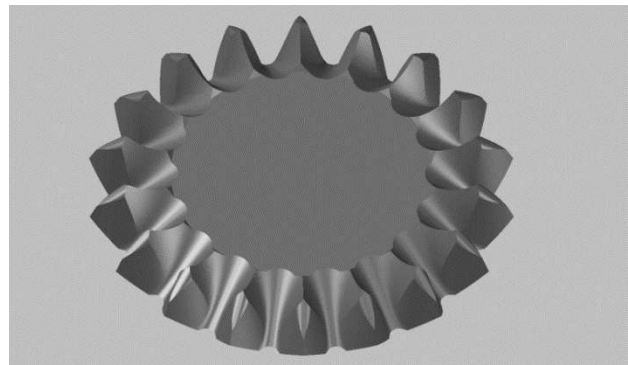
9. ábra. $\theta=75^\circ$ -os testmodell, főnézet



10. ábra. $\theta=75^\circ$ -os testmodell, oldalnézet



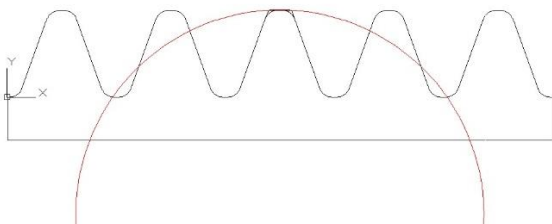
11. ábra. $\theta=50^\circ$ -os testmodell



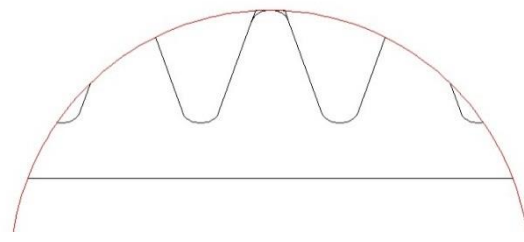
12. ábra. $\theta=30^\circ$ -os testmodell

A fogak alámetszését és kihegyesedését a fogszám növelésével csökkenthetjük. Ez igen nagymértékben megnövelheti a tányérkerék méretét, ezért nem minden esetben alkalmazható a gyakorlatban. A túlzott kihegyesedés és alámetszés a lécc-típusú szerszámnak köszönhető. Ezzel a hagyományos léccel csak megfelelően nagy θ dőlésszögű, vagy nagy fogszámú, a használathoz megfelelő fogazattal rendelkező tányérkeréket generálhatunk.

A fogasléc optimalizálásával csökkenthető az alámetszés és a kihegyesedés. Egy körívvel elmetszve a léccprofilat ideálisabb fogazat-méreteloszlást kapunk a generáláshoz. Az eljárás és az általa kapott aktív lécdarab profilja a 13. és 14. ábrákon látható.



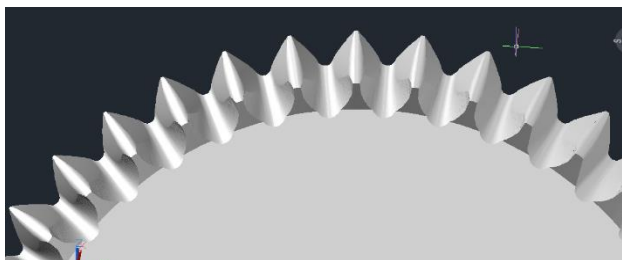
13. ábra. A fogasléc elmetszése a körívvel



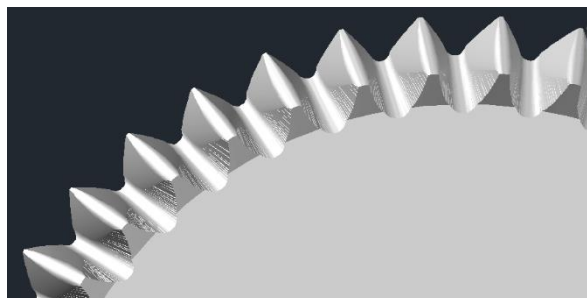
14. ábra. A metszés után kapott aktív lécdarab

Vizsgálatot végeztem két teljesen azonos paraméterekkel rendelkező tányérkerék ($\theta=40^\circ$, $m=3$, $z=40$) lefejtésekor. Az elsőt a normál lécc-típusú szerszámmal végeztem, a másodikat az optimalizált, kör által korrigált kiterjedésű léccel generáltam. Az eredményül kapott kerekek fogazatát a 15. és 16. ábrán tekinthetjük meg. A fogasléc lemetszéséhez használt kör sugarának, a 4-es ábrán is feltüntetett, „rkup” értéket adtam. Ennek a körnek a sugarát is optimalizálni kell, melyet a θ szög és az „rkup” értéke határoz meg. Ezzel kapcsolatos számításaimat a kutatás következő fázisában fogom elvégezni. Feltételezem, hogy egy adott tányérkeréknek

több hengeres kerékkal való kapcsolódása esetén a lefejtő szerszámot a legnagyobb fejkörsugarú fogaskerék szerint kell lehatárolni. Az általam használt értékkel végzett vizsgálat kielégítő testmodellekhez vezetett. Egy számításokkal vagy szimuláció sorozattal optimalizált sugarú határcső használatával nagyobb mértékű javulást kaphatunk a fog alámetszésének és kihegyesedésének elkerülésében.



15. ábra. A hagyományos léccel lefejtett tányérkerék



16. ábra. A módosított léccel lefejtett tányérkerék

7. A számítógépes szimuláció programjának szerkezete

Pontos fogaskerekek gyártása esetében a lefejtés a legelterjedtebb megmunkálási forma. A generálás során létrejövő fogprofil tanulmányozását nehézkessé teszik a bonyolult matematikai összefüggések. Ezek elkerülhetők, ha számítógépes szimulációt alkalmazunk a forgácsolási művelet során fellépő relatív elmozdulásra.

A szimulációt AutoLisp programozási nyelven írtam meg, melyet az Autocad szoftver segítségével jelenít meg. A megjelenítés a testkivonásos módszert alkalmazza, amely az Autocad szoftver jellegzetes művelete. A kivonás lényege abban áll, hogy az előre kigenerált, szabvány méretű szerszám és a tányérkerék áthatásának megfelelő térfogatot eltávolítja a tányérkerékből, úgy, hogy a keletkező testmodell határfelülete a tányérkerék és az áthatás határfelületéből áll össze. Míg a valóságban a kés folytonosan vágja ki az anyagot a munkadarabból, a szimuláció során csak bizonyos időpillanatokban történik meg a kivonás. Ezáltal a testmodell felülete nem lesz sima, a fogprofil lépcsőzetes formát fog kapni. Ha a lépést megfelelő finomságúra állítjuk, akkor ez a hiba elhanyagolható. A léptetés nagyságát a kerék elfordulási szöge határozza meg, aminek a szimuláció során a számítógép teljesítménye szab határt a következő összefüggések szerint.

$$l_{\text{lépés}} = \theta \cdot r_{\text{kúp}} \quad (19)$$

A különböző változóknak rendhagyó nevei (a fogasléc szélessége, a kúp magassága, illetve a gördülőkör sugara), a program írását rendkívül megkönnyítik. Ezáltal csökken az egyes műveletek hibás megírásának esélye is.

A program öt fő lépésből tevődik össze, melyek a következők:

- 1) inicializálás;
- 2) adatok bekérése;
- 3) a testmodellekhez és a szimulációhoz szükséges számítások elvégzése;
- 4) modellek elkészítése;
- 5) a szimuláció futtatása;

Ezzel az eljárással nagy pontosságú testmodellek készíthetők, ezért felhasználhatóak virtuális kinematikai vagy dinamikai hajtásvizsgálatokra, vagy akár 3D nyomtató segítségével kézzelfogható testmodelleket is gyárthatunk.

Következtetések

Különböző fogaskerekek kapcsolásának tanulmányozása nélkülözhetetlen új hajtások fejlesztésében, illetve létező hajtások hajtásparamétereinek javításában. Az előbbieken bemutatott eljárás költsége nem túl magas és maga a program megfelelően rugalmas. A program finomítása során, az elkövetkezőkben olyan új funkciók is bevezethetők, mint a hajtás működésének vizsgálata valós körülmények között. A hordkép vizsgálata és a relatív csúszások tanulmányozása elengedhetetlenül szükséges a hajtás geometriai vizsgálatához.

Tudva, hogy ugyanazon egyenes profilú lécszerszám által generált fogaskerekek helyesen kapcsolódnak, a külső kúpos hengeres hajtás minden körülmények között megvalósítható. A számítógépes szimuláció segítségével képet kaphatunk a lefejtett fogaskerékről, anélkül, hogy a nehezen kezelhető matematikai összefüggéseket fel kelljen állítani, ám ezek feltétlenül szükségesek a mélyrehatóbb kapcsolódás vizsgálat elvégzésekor. Ezen egyenletek alapján újabb szimulációs modellek állíthatók fel, amelyek alapjai a jelen lefejtési modellel meg kell egyezzenek.

A továbbiakban a hajtás működésének szimulációja és az érintkező felületelemek megállapítása a cél.

Szakirodalom

- [1] Papp, I. *Mechanizmusok elmélete*, Scientia Kiadó, Kolozsvár, **2010**.
- [2] Hollanda, D. *Bazele aşchierii și generării suprafețelor*. Universitatea Petru Maior Târgu Mureș, Târgu Mureș, **1996**.
- [3] Litvin, F.L. *A fogaskerékkapcsolás elmélete*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, **1974**.
- [4] Litvin, F.L. *Teoria angrenajelor și geometria aplicată* (trad. acad. dr. ing. Csibi V. e. a.) , Editura Dacia, Cluj Napoca, **2012**.

A klasszikus geometriájú egyenes fogú metszőkerék elméleti profilhibájának transzponációja a gyártott fogaskerékre

The transfer of the theoretical profile error of a straight fellows cutter on the machined gear

KÁNTOR Anna-Erzsébet¹, LACZKÓ-BENEDEK Brigitta²

¹kantoranna@yahoo.com, ²brigitta_laczkobenedek@yahoo.com

^{1,2}Sapientia EMTE, Marosvásárhely Műszaki és Humán Tudományok Kar

Vezető tanára: Dr. MÁTÉ Márton

Kivonat

Az egyenesfogú metszőkerék tervezési geometriájának következményeképpen, a szerszámnak elméleti profilhibája lesz, amelynek hatásait a minimális fejszalag-geometria megválasztása teszi elfogadhatóvá. Ennek következményeképpen az oldaléleken fellépő működő geometria a forgácsképzés szempontjából nem megfelelő. Jelen tanulmány azt vizsgálja, hogy a klasszikus élezésű egyenesfogú metszőkerék profilhibája milyen módon transzponálódik a gyártott darab profiljára, a szerszám, illetve a gyártott alkatrész geometriai paramétereinek függvényében

Kulcsszavak: Metszőkerék, profil, profileltolás, szerszám-profilhiba, darab-profilhiba, fogszám

1. BEVEZETŐ

Az evolvens fogprofil metszőkerékkel való kialakításának folyamata Fellows-féle lefejtő fogazásként van számontartva a szakirodalomban. Ez az eljárás két fogaskerék összehajtásának elvén alapszik, azzal a különbséggel, hogy az egyik kerék a forgó mozgáson kívül egy tengelyirányú, vagy ferde fogazat lefejtése esetén csavarmozgást is végez. E tekintetben a metszőkerék értelmezhető egy olyan idomként, amely végtelen sok végtelenül vékony fogaskerékből van összeállítva, és ezek különböző, de a tengely irányában lineárisan csökkenő profileltolással rendelkeznek.

Dolgozatunkban vizsgáljuk az egyenes fogú metszőkerékkel generált evolvens fogprofil geometriáját, valamint összehasonlítjuk ezt egy, a metszőkerék fogszámával megegyező fogszámú evolvens fogaskerék fogprofiljával. Munkánk során geometriai modellt állítottunk fel, amelyet számítógépes ábrázolással vizsgáltunk ehhez a MathCad és GeoGebra szoftvereket vettük igénybe.

1.1. A metszőkerékes fogaskerék-vésés kinematikája

A metszőkerékeket főleg belső fogazatok generálásánál alkalmazzák, hiszen más lefejtésre használt szerszámok – mint a fogasléc és csigamaró – nehezen vagy egyáltalán nem alkalmazhatók erre a célra. Emellett felhasználják külső fogazat kialakítására is.

A fogvésőgépet és szerszámát, a metszőkeréket Fellows találta fel, és 1899-ben szabadalmaztatta. A munkadarab és a szerszám elhelyezkedését, a fogvésésre jellemző mozgásokat az 1. ábra szemlélteti. Fogvéséskor a szerszám és a munkadarab tengelyei párhuzamosak. A lefejtést a szerszám és a munkadarab összehangolt forgómozgása adja.

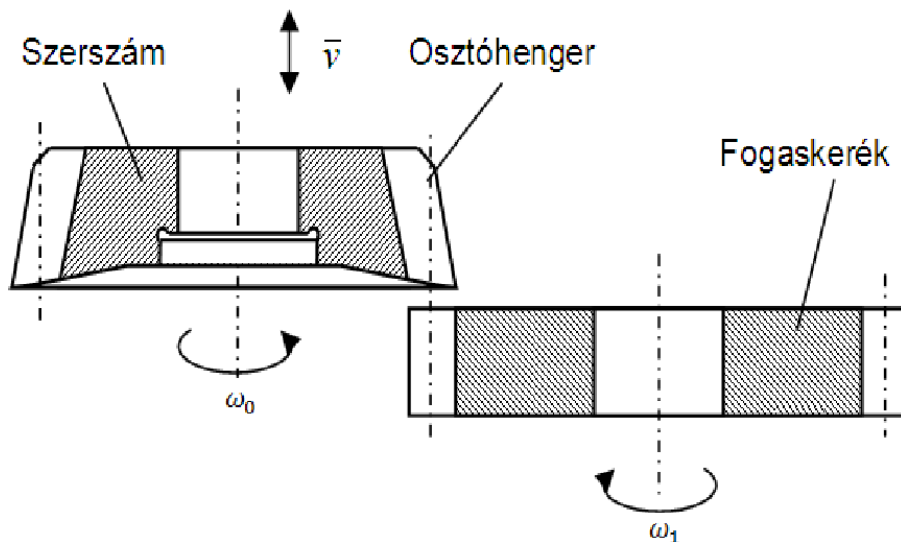
A szögsebességek között fennálló kapcsolat az áttétellel fejezhető ki, mely egyenlő a fogszámviszonnyal:

$$i = \frac{\omega_0}{\omega_1} = \frac{z_1}{z_2} \quad (1)$$

A forgácsoló mozgás a szerszám függőleges alternáló mozgása. Fogvéséskor kétféle előtólast különböztetünk meg: a sugárirányú- és a kerületi előtólast. A sugárirányú előtólast vezérlőtárcsával, vagy menetes orsóval valósítják meg, a kerületi előtólast a szerszám osztókörén mért, egy lökethez vonatkozó elfordulásnak megfelelő ívhossz, mm-ben kifejezve. Forgácsolás közben mind a szerszám, mind a munkadarab állandó szögsebességű, helytálló tengely körüli forgó mozgást végeznek. A kettőslököt visszatérő részének végrehajtásakor egy bütykös tárcsa eltolja a forgóasztalt, de nem a tengelyvonal irányában, hanem ehhez képest jól meghatározott, a fogszámviszonyok és az előtólast függvényében kiszámított ψ szöggel és Δ_{ψ} értékkel [6]. Így a

forgácsolt felület rugalmasságából adódó ütközést (kollíziót), melynek fogcsúcsletörés lenne a következménye, elkerüljük.

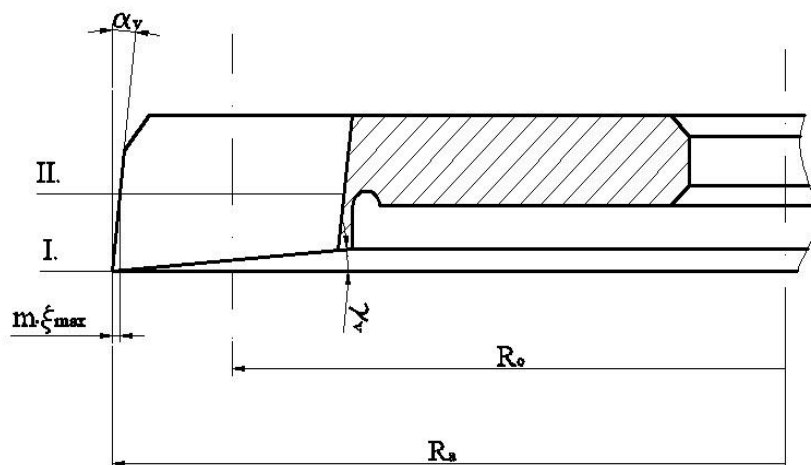
Fogvéséssel egyenes és ferde fogú fogaskerek is előállíthatók. Egyenes fogú fogaskereket egyenes fogú szerszámmal, ferde fogú fogaskereket ferde fogú szerszámmal lehet gyártani. Mivel a fogasgyűrűs tengelykapcsolókba egyenes fogú belső fogazatú kereket építenek be, a továbbiakban csak az egyenes fogazattal foglalkozunk.



1. ábra

2. A METSZŐKERÉK GEOMETRIÁJA

A metszőkerék felépítésében nagyon hasonlatos a fogaskerékhez, különbség elsősorban a fogoldal alakjában rejlik. Az egyenes fogú metszőkereket összehasonlítva az ugyanolyan típusú fogazattal rendelkező fogaskerékkel azt vehetjük észre, hogy míg a fogaskerék fogoldala evolvens alapgörbéjű egyenes henger, addig a metszőkerék fogoldala, a profiletolás tengelymenti lineáris csökkenése miatt csavarfelület lesz [1-4]. Ennek az az oka, hogy a metszőkerék fogai, a profiletolás csökkenése miatt lineárisan csökkenő fogív-hosszal rendelkeznek az osztóköron, amelynek egyenes következménye a különböző magasságokban levő evolvens profilok arányos „becsavarodása” a fog szimmetria-síkjának irányába.



2. ábra

Az egyenesfogú metszőkerék homlokszférület az összes fog számára közös, a szerszám tengelyével egybeeső tengelyű egyenes körkúp, melynek generátora a homloksíkkal γ_v szöget zár be mely egyúttal a konstruktív ortogonális csúshomlokszög.

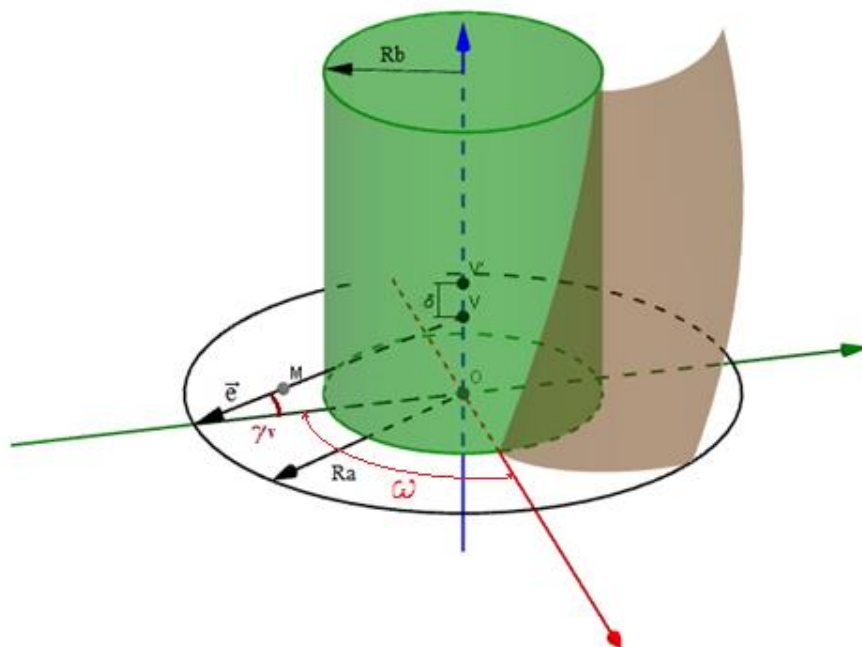
A fogoldalt a következő egyenletek írják le:

$$\begin{cases} x(u, v) = Rb \cdot (\cos(u + v) + u \cdot \sin(u + v)) \\ y(u, v) = Rb \cdot (\cos(u + v) - u \cdot \sin(u + v)) \\ z(u, v) = p \cdot v \end{cases} \quad (2)$$

Ezek egy evolvens csavarfelület egyenletei, amelynek az emelkedése p , a csavarmozgás paramétere v . Az evolvens alapkörének sugarát Rb , az u pedig az evolvens paraméterét jelöli. Meg kell jegyezni, hogy a metszőkerék alapköre eltér a vele ekvivalens fogaskerék alpkörétől, mivel a szerszámkapcsolószöget az alábbi képlettel [1-4]

$$\operatorname{tg} \alpha_s = \frac{\operatorname{tg} \alpha_0}{1 - \operatorname{tg} \gamma_v \operatorname{tg} \alpha_v} \quad (3)$$

A fogoldal felületének modelljét a 3. ábra szemlélteti.



3. ábra

3. A MATEMATIKAI MODELL

3.1. Kezdeti adatok

- $\alpha_0 = 20^\circ$ – a fogaskerék kapcsolószöge
- $\alpha_{0s} \approx 20,171^\circ$ – a szerszám kapcsolószöge
- $R_0 = \frac{m \cdot z}{2}$ – a szerszám osztóköri átmérője
- $R_b = \frac{m \cdot z}{2} \cdot \cos \alpha_{0s}$ – a szerszám alapköre
- $r_b = \frac{m \cdot z}{2} \cdot \cos \alpha_0$ – a munkadarab alapköre
- $\alpha_v = 6^\circ$ – a szerszám hátszöge
- $\gamma_v = 5^\circ$ – a szerszám homlokszöge
- $m = 5$ – modul

$p = \frac{Rb}{\operatorname{tg}\beta_b}$ – a csavarfelület menetemelkedése
 β_b – a csavarfelület emelkedési szöge az alapköri hengeren
 $h_0 = 1$ – fejmagasság tényező
 $c_0 = 0,25$ – fejhézag tényező
 $c_a = 0,3$ – lábhézag tényező
 a – hátfelületi kopás

3.2. A metszőkerék burkolókerékének profilja

A (2) parametrikus fogoldal-egyenletekhez, melyekben

$$p = \frac{R_{b0}}{\operatorname{tg}\beta_b} \quad (4)$$

hozzárendeljük a homlokkfelület kúpjának egyenleteit. Ezt implicit formában kell megkapnunk, de könnyebb a parametrikus formát felírni először. A megfogalmazást általánosítjuk azáltal, hogy a metszőkeréket tetszőleges élezési stádiumban levőnek tekintjük, ami azt jelenti, hogy az a hátkopásnak megfelel a homlokkúp csúcsának δ értékkel való többlet- felemelése az (xy) sík fölé, ahol

$$\delta = a \cdot \cos(\alpha_v) - \sin(\alpha_v) \cdot \operatorname{tg}(\gamma_v). \quad (5)$$

Megjegyezzük, hogy az új szerszám homlokkúp-csúcsának z - koordinátája $Ra \cdot \operatorname{tg}\gamma_v$.

A kúpfelület tetszőleges M pontjának koordinátáit a tetszőleges generátor \mathbf{e} egységvektorával és a csúcs-tól való λ távolsággal adjuk meg:

$$\mathbf{VM} = \lambda \cdot \mathbf{e} = \lambda \cdot \begin{pmatrix} \cos\gamma_v \cdot \cos\omega \\ \cos\gamma_v \cdot \sin\omega \\ -\sin\gamma_v \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Az új csúcs koordináta- oszlop a következő:

$$\mathbf{OV}' = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ Ra \cdot \operatorname{tg}\gamma_v + \delta \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Ezzel a kúp parametrikus egyenletei a következők lesznek.

$$\mathbf{VM} + \mathbf{OV}' = \begin{pmatrix} x(\lambda, \omega) \\ y(\lambda, \omega) \\ z(\lambda, \omega) \end{pmatrix}, \begin{cases} x(\lambda, \omega) = \lambda \cdot \cos\gamma_v \cdot \cos\omega \\ y(\lambda, \omega) = \lambda \cdot \cos\gamma_v \cdot \sin\omega \\ z(\lambda, \omega) = Ra \cdot \operatorname{tg}\gamma_v + \delta - \lambda \cdot \sin\gamma_v \end{cases} \quad (8)$$

A kúp parametrikus egyenleteiből kifejezzük az implicit egyenletet:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = \lambda^2 \cdot \cos^2\gamma_v \\ (z - Ra \cdot \operatorname{tg}\gamma_v - \delta)^2 = \lambda^2 \cdot \sin^2\gamma_v \end{cases}$$

Ezzel

$$\frac{x^2 + y^2}{(z - Ra \cdot \operatorname{tg}\gamma_v - \delta)^2} = \operatorname{ctg}^2\gamma_v.$$

Majd innen

$$x^2 + y^2 - (z - Ra \cdot \operatorname{tg}\gamma_v - \delta)^2 \cdot \operatorname{ctg}^2\gamma_v = 0. \quad (9)$$

Az evolvens csavarfelület (2) egyenleteit behelyettesítve a (9)-be, megkapjuk a csavarfelület u, v paramétereinek közötti összefüggést:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = Rb^2 \cdot (1 + u^2) \\ z = \frac{Rb}{\operatorname{tg}\beta_b} \cdot v = p \cdot v \end{cases},$$

majd

$$Rb^2 \cdot (1 + u^2) = \left(\frac{p \cdot v - \delta}{\operatorname{tg}\gamma_v} - Ra \right)^2,$$

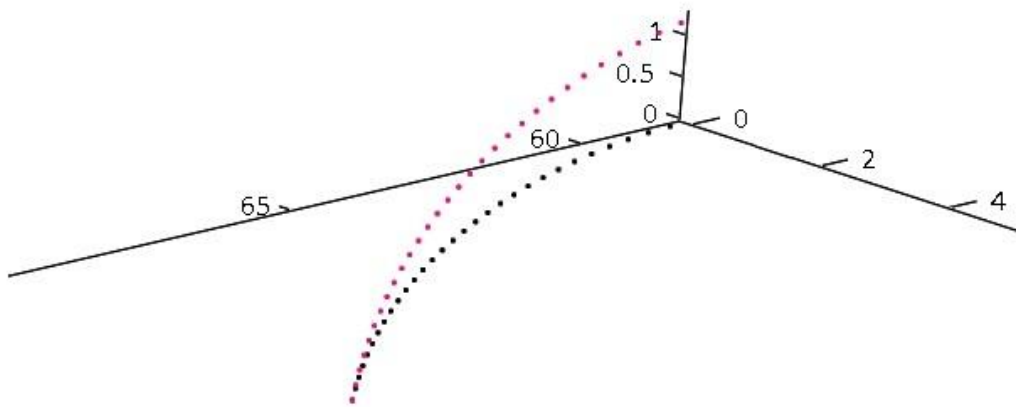
ahonnan

$$\frac{p \cdot v - \delta}{\operatorname{tg} \gamma_v} - R_a = \pm R_b \cdot \sqrt{1 + u^2},$$

$$v(u) = \frac{1}{p} \cdot (\delta + (R_a + R_b \cdot \sqrt{1 + u^2}) \cdot \operatorname{tg} \gamma_v).$$
(10)

A (10) és (2) egyenletekből kapjuk a metszőkerék élegyenleteit:

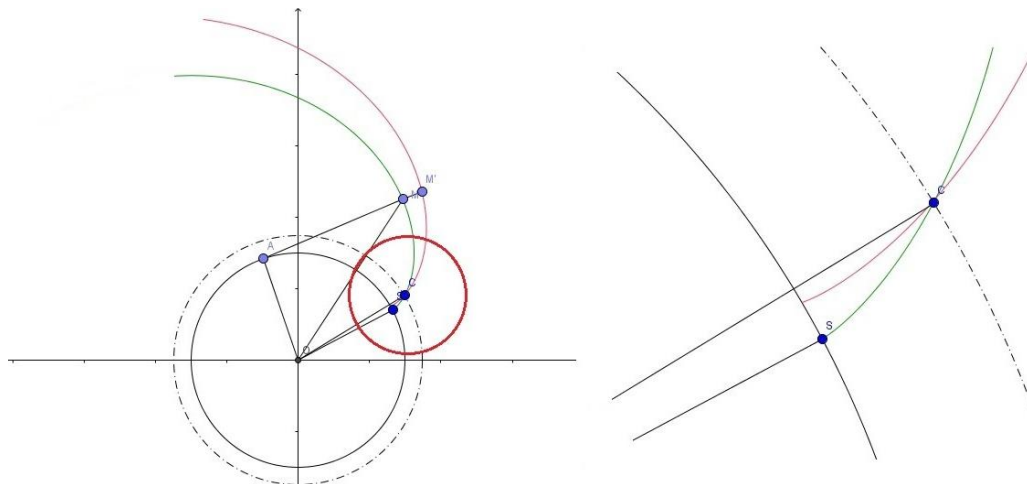
$$\begin{cases} x(u, v(u)) = R_b \cdot (\cos(u + v(u)) + u \cdot \sin(u + v(u))) \\ y(u, v(u)) = R_b \cdot (\cos(u + v(u)) - u \cdot \cos(u + v(u))) \\ z(u, v(u)) = \frac{R_b}{\operatorname{tg} \beta_b} \cdot v(u) \end{cases}$$
(11)



4. ábra

A 4. ábrán látható a metszőkerék élgörbéjének összehasonlítása a szerszámevolvenssel.

Ezt levetítettük a főmozgás irányára merőleges síkra, így megkaptuk a metszőkerék által generált valós fogprofil-görbét (5. ábra).



5. ábra

3.2. A hiba kiszámítása

A hibát, a [4] alapján, a metszőkerékkel ekvivalens fogaskerék evolvens fogprofilja és az élvétületgörbe közötti távolságként értelmezzük. Eltérő módon a [4]-ben felállított matematikai modelltől, az eltérést az ekvivalens fogaskerék evolvensére merőlegesen mérjük. Az ekvivalens evolvenst az élvétület osztóköri pontjához rendeljük. Elemi geometriai megfontolások után a következő képletet kapjuk,

$$\delta e = r_b \cdot \left(\arccos \left(\frac{r_b}{\sqrt{x_A^2 + y_A^2}} \right) + \arccos \frac{y_A}{x_A} - \arccos \frac{y_0}{x_0} + \text{inv} \alpha_0 \right), \quad (12)$$

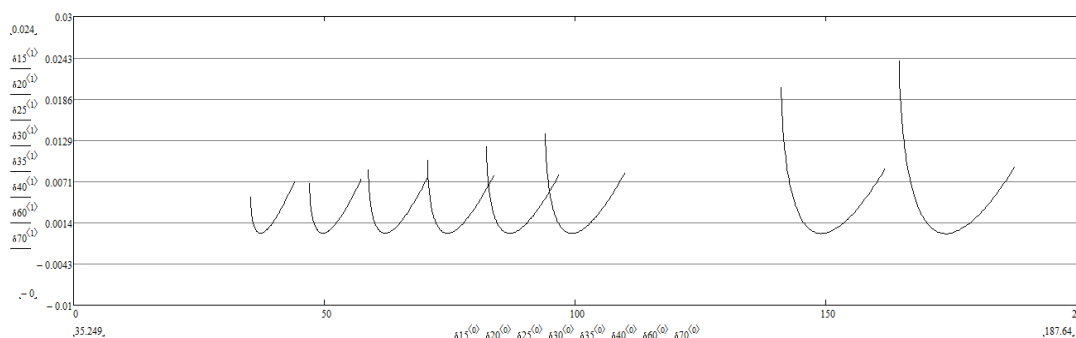
ahol:

δe – a metszőkerék által generált fogprofil eltérése az evolvens profiltól

r_b – az ekvivalens fogaskerék alapkör-sugara

$A(x_A, y_A)$ – a fogprofil és a fogaskerék alapkörének metszéspontja

$C(x_0, y_0)$ – a fogprofil és a fogaskerék osztó körének metszéspontja.



6. ábra

A hiba kiszámítására a MathCad szoftvert használtuk: betápláltuk az adatokat és a képleteket, majd programot írtunk a matematikai modell ellenőrzésére és a hiba kiszámítására. Különböző fogszámokra a 6. ábrán szemléltetett hibagörbék keletkeznek.

4. KÖVETKEZTETÉSEK

A profilhiba változása a fogszám függvényében

Vizsgáltuk a kapott eredmények alapján, hogy a fogszám változtatásával milyen jellegű eltérések keletkeznek.

Számításaink azt bizonyították, hogy a metszőkerék fogszámának a növelésével a hiba mértéke növekszik. A hiba egysége a vizsgált fogszámok esetén eléri a 10^{-2} értéket is. Ugyanakkor észrevehető, hogy az alapkörön való eltérés $z_0=25$ -nél nagyobb fogszám esetén kisebb, mint a fejkörön kiszámított eltérés.

A klasszikus, egyenesprofilú léccel képzett metszőkerék profilhibáját csökkenteni csak akkor lehet, hogyha a szerszám végtelen fogra való kiterjesztésének elegáns, de elavult hipotézisét ejtjük, és ezt a generáló kerék hipotézisével helyettesítjük [4].

5. IRODALOMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Hollanda, D. *Bazele aşchierii și a generării suprafețelor*. Universitatea Petru Maior Târgu Mureș, **1996**.
- [2] Hollanda D., Máté M. *Aschiere și scule*. Editura Universității Petru Maior, Târgu Mureș, **2004**.
- [3] Szeniczai L. *Az általános fogazás*. Budapest, Műszaki Könyvkiadó, **1955**.
- [4] Máté M. *Contribuții la îmbunătățirea parametrilor geometrice și cinematice ai cuțitelor roată cu dinți înclinați*. Referatul nr. 2. Universitatea "Transilvania" din Brașov, **1996**.
- [5] Kelemen L., Szente J. *Fogasgyűrűs tengelykapcsolók fogérintkezésének elemzése*. Miskolc. Egyetemi Könyvkiadó.
- [6] Bouzakis, K. *Die Vermeidung der Kollision und die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit der Verzahnungsprozess bei Stoßräder*. Doktor genehmigtes Dissertation, Rhein-Westfälischer Techniker Hochschule, Aachen, **1978**.

A hőre lágyuló polimerek folyási mutatószámának (MFI) mérésére alkalmas kapilláris plasztométer tervezése és kivitelezése

Design and implementation of a laboratory melt-flow indexer

BALIKA Róbert-Márton

br6518@gmail.com

S.C. Elplast S.R.L.,
520037 Sfântu Gheorghe / Sepsiszentgyörgy,
Forrás utca 6B.,
+40 745 050 257, +40 267 317 203, elplast.ro

Vezető tanára: Dr. GERGELY Attila-Levent

Kivonat

A dolgozat célja egy, a hőre lágyuló polimerek folyási mutatószámának (Melt-Flow Index, MFI) meghatározására alkalmas laboratóriumi kapilláris plasztométer tervezése és kivitelezése. A tervezett berendezés a Sapientia EMTE, Marosvásárhelyi Karának Gépészmérnöki Tanszékéhez tartozó Polimertechnológia laboratórium számára készül. A tervezés és megépítés során az ISO 1133-1 (2011) szabvány alapján felállított kritériumrendszer és a költséghatékony kivitelezés a fő szempontok. A szabvány követése a tervezés során lehetővé teszi az elkészült berendezés és az iparban használt MFI mérő berendezések összehasonlítására.

Kulcsszavak: polimer, polimerek tesztelése, viszkozitás, kapilláris plasztométer, folyási mutatószám

1. A HŐRE LÁGYULÓ POLIMEREK

A polimer anyagok a makromolekulák összesége. A makromolekula ismétlődő és azonos szerkezetű egységekből felépülő molekula mely molekulatömege általában nagyobb, mint 5000 Da. A makromolekulákat felépítő ismétlődő egységek kiindulási anyaga a monomer. [1]

A polimerek kétféleképpen lehetnek:

- természetes polimerek (cellulóz, fehérjék, természetes gyanták);
- szintetikus polimerek (elasztomerek, műanyagok, térhálós gyanták).

A polimer önmagában még nem műanyag, a polimerizáció utolsó lépéseként a polimerhez adalékokat vagy társító anyagokat adnak hozzá, ezért a polimer összetétele, tulajdonságai és szerkezete is megváltozik. Az adalékokkal ellátott polimereket nevezik műanyagoknak. [1]

A hőre lágyuló polimerek és műanyagok kétféle anyagszerkezettel rendelkeznek:

- amorf anyagszerkezet: rendezetlen szerkezet;
- kristályos anyagszerkezet: rendezett szerkezet;

A kristályos anyagszerkezet a műanyagok esetében azonban sosem teljesen kristályos, hanem csak egy bizonyos százalékig, ez adja az anyagszerkezet rendezettségének fokát, amit kristályosság foknak is neveznek.

Az amorf anyagszerkezetű polimerek tulajdonságaira jellemző az üvegesedési hőmérséklet, míg a kristályos anyagszerkezetű polimerekre az olvadási hőmérséklet a jellemző. A részlegesen kristályos polimerek rendelkeznek úgy üvegesedési hőmérséklettel, mint olvadási hőmérséklettel. A hőre lágyuló műanyagok esetében az üvegesedési hőmérséklet és/vagy az olvadási hőmérséklet szobahőmérséklet felett van, ez a hőmérséklet határozza meg a műanyag alkalmazhatóságának felső határát. Ha az amorf polimerek üvegesedési hőmérséklete szobahőmérséklet alatt van akkor szobahőmérsékleten az anyag erő hatására deformálódik, azonban az erőhatás megszűnése után visszanyeri eredeti alakját, ezek az elasztomerek és a gumik (térehálósított elasztomerek). A polimer molekula hajlékonysága az a tulajdonság, amely a legjobban befolyásolja a fizikai állapotot és az üvegesedési hőmérsékletet. [1]

1.1. A hőre lágyuló polimerek viszkozitása

A hőre lágyuló műanyagok feldolgozása legnagyobb mennyiségben ömledékállapotban történik. Az ilyen típusú feldolgozásra jellemző a nagyon nagy termelékenység és a kis mennyiségben előforduló gyártás során képződő hulladék. A feldolgozás történhet még nagyon rugalmas állapotban, amit termoformázásnak neveznek vagy szilárd állapotban, ami a mechanikai megmunkálás. A legelterjedtebb megmunkálási technológiák pedig a következők:

- extrúzió
- fröccsöntés
- extrúziós fúvás
- fröccsfúvás
- rotációs öntés
- kalanderezés

A polimer ömledék viselkedését a struktúrvizskózus modell írja le a legpontosabban. Az ömledék állapotú polimer folyásgörbéje a következőképpen képzelhető el ezen modell értelmében: extrém kis terhelés és extrém magas terhelés esetén newtoni folyadékként viselkedik, míg abban a tartományban, amelyben általában feldolgozzák egy hatványfüggvény írja le. Az ismert folyásgörbe alapján felírható a polimer ömledék viszkozitásgörbéje is.[2] A folyási mutatószám (Melt Flow-Index, MFI) a polimer ömledék folyóképességét jellemzi konstans hőmérséklet és konstans terhelés mellett. A mérés során a folyás sebességét a kapillárison tíz perc alatt átfolyó anyagmennyiség tömege vagy a dugattyú mért elmozdulása adja meg. A folyóképesség pedig szorosan összefügg a vizsgált polimer átlagos molekulatömegével is, tehát az MFI a molekulatömeget is jellemzi. Minél nagyobb átlagos molekulatömegű a vizsgált polimer, annál nagyobb lesz a viszkozitása és így kisebb lesz a mért MFI érték. [3]

A gyárak és a laboratóriumok számára a folyóképesség vizsgálatának a legegyszerűbb, legköltséghatékonyabb és időben is a legkedvezőbb módja az MFI mérése, ezért majdnem minden műanyag megmunkálással foglalkozó gyárban és laboratóriumban megtalálható. A folyási mutatószám által nyújtott információ általában elegendőnek bizonyul ahhoz, hogy a megfelelő megmunkálási paramétereket meg tudják határozni a gyártástechnológusok.

1.2. Az MFI mérése, mérés előkészítése, menete és kiértékelése

Az MFI mérés során, adott hőmérséklet és adott terhelés mellett, a kapillárison keresztül 10 perc alatt kiáramló polimer ömledék tömegét mérik meg. A megmért polimer minta tömegét grammban kell megadni, tehát az MFI mértékegysége g/10 perc.

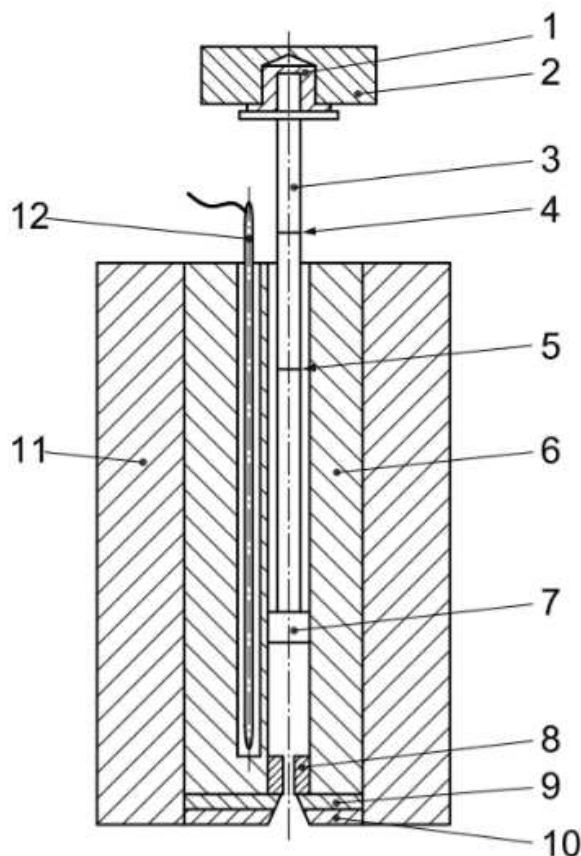
Az MFI mellett létezik még MVI (Melt Volume Index) ami a térfogatra vonatkoztatott folyási mutatószám, ennek mértékegysége a $\text{cm}^3/10$ perc.

A hengerbe töltött és folyékony ömledék állapotba felmelegített polimert a dugattyú fej a rá szerelt terhelés hatására kinyomja a kis átmérőjű kapillárison. A henger fűtése fűtőelemmel biztosítható és a kívánt hőmérséklet beállításáról egy hőmérséklet szenzor és a hengeren található szigetelés gondoskodik. A terhelésnek cserélhetőnek kell lenni, mivel polimer típusonként változik a terhelés nagysága. A henger fűtéséhez szükséges hőmérséklet és a használandó terhelés változik a műanyag típusától függően. A vizsgálandó műanyag szabványa pontosan meghatározza, hogy milyen hőmérséklet és terhelés mellett kell a méréseket elvégezni.

Az [4] két mérési módszert ír elő, „A” és „B” metódus szerint. A hőmérsékletre és nedvességre érzékeny polimerek esetén pedig az ISO 1133-2:2011 szabvány által előírt kritériumrendszert kell alkalmazni.

Az „A” mérési módszer alkalmazása során az elkészült polimer minták átlagtömege alapján kerül kiszámításra az MFI értéke. A „B” mérési módszer esetében azonban az alábbi két lehetőség közül valamelyiket kell mérni:

- a dugattyú által megtett távolság egy előre meghatározott időintervallum alatt
- a dugattyú által, előre meghatározott, távolság megtételéhez szükséges idő



1. ábra

A kapilláris plasztométer elvi rajza [4]

- 1.,10.,11 - hőszigetelés; 2. - eltávolítható súly; 3. - dugattyú szára;
 4. - felső referencia vonal; 5. - alsó referencia vonal; 6. - fűtött henger;
 7. - dugattyú fej; 8. - kapilláris; 9. - kapillárstartó lap;
 12. - hőmérséklet szenzor.

Az „A” mérési módszer: A polimer granulátum hengerbe történő elhelyezése során a granulátum szemek között található levegőt ki kell préselni onnan, mert a melegítés közben a polimer szemek közé szorult levegő miatt kialakuló légbuborékok hibás mérést eredményezhetnek, főleg oxidációra érzékeny polimerek esetében. A henger előmelegítése átlagosan 5 percet tart. Az előmelegítési idő kisebb olyan polimerek esetében melyek könnyen degradálódnak hőmérséklet hatására és nagyobb azon polimerek esetében melyek magas olvadási vagy magas üvegesedési hőmérséklettel rendelkeznek. A dugattyú szarán található két jelzés, az alsó és felső referencia vonal. A mérés akkor veszi kezdetét mikor az alsó referencia vonal eléri a henger felső peremét, az előmelegítés során a kapillárison át távozó polimert ebben a pillanatban le kell vágni és ettől a pillanattól kezdődik a tényleges mérés. A két vágás közötti időt úgy kell megválasztani, hogy a minta hossza 10-20 mm között legyen. A mérés akkor ér véget mikor az dugattyú szarán található felső referencia vonal eléri a henger felső peremét. Azok a minták nem elfogadhatóak melyek levegő buborékot tartalmaznak. A minták egyesével történő megmérése után ezek átlagos tömegét kell meghatározni. A kapott eredmény akkor reprezentatív, ha a legnagyobb és legkisebb minta tömege közötti különbség nem nagyobb, mint az átlag tömeg 15%-a, ha ez nem teljesül akkor a teljes mérést meg kell ismételni. Az előmelegítés és az utolsó mintavételezés között nem telhet el több mint 25 perc, ha a vizsgálni kívánt polimer tulajdonságai indokolják vagy degradálódnak hőmérséklet hatására, akkor ezt az időt lehető legkisebbre kell redukálni. Ezt a módszert akkor célszerű használni, ha 240 s-os vágási időintervallumban a minta tömege nagyobb mint 0,04 g, ha ez nem teljesül akkor a „B” metódus szerinti mérést kell alkalmazni. [4]

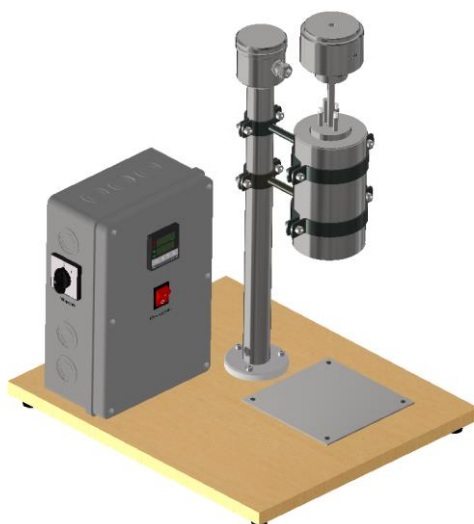
Az „A” módszer szerint a mérés eredményét a levágott minta tömege adja meg: [4]

$$MFI = \frac{600 \cdot m}{t} \quad (1)$$

m – a levágott minták tömegének átlaga grammban kifejezve
t – a két minta levágása között eltelt idő másodpercben kifejezve
600 – átváltást segítő érték g/s-ból g/10 percbe (600 s)

2. A TERVEZETT KAPILLÁRIS PLASZTOMÉTER

A tervezett kapilláris plasztométer az ISO 1133-1:2011 szabvány által előírt kritériumrendszer minél pontosabb betartásával készült. A szabvány által előírtaktól bizonyos esetben eltérések történtek, az eszközölt eltérések a költséghatékonyság nevében történtek, illetve és bizonyos megmunkálási műveletek nehéz megvalósíthatósága végett. A tervezett berendezés Autodesk Inventor 2021-ben elkészített 3D modellje a 2. ábrán látható.



2. ábra. A tervezett kapilláris plasztométer 3D modellje



3. ábra. A megvalósított kapilláris plasztométer

A berendezés kritikus alkatrészei (dugattyú, fűtött henger, kapilláris) X5CrNi18-10 (AISI 304) rozsdamentes acélból készültek, ez az anyag jó sav- és korrózió álló, viszont kevésbé jó hővezető tulajdonságokkal rendelkezik. A dugattyúfej, a kapilláris és a fűtött henger központi átmenő furatának paraméterei (méretek, tűrései, felületi érdességek) csak megközelítik a szabvány által előírtakat, mert a pontos előírások megvalósítása nagyon költséges lett volna.



4. ábra. A megvalósított fűtött henger

A fűtött henger külső átmérője $\varnothing 50$ mm és magassága 150 mm. A henger alján található 4 darab M5-ös menettel ellátott furat, amelyek egy $\varnothing 40$ mm-es furatkörön helyezkednek egymástól 90° -os osztással. A négy menetelt furat segítségével valósítható meg a kapillárstartó lapnak a fűtött hengerhez csavarkötéssel történő rögzítése. A henger tetején található négy furat. A 4 furatból 3 darab $\varnothing 6.5H7$ átmérővel és 142 mm-es mélységgel készült. A 4. furat lépcsőzetes kialakítású, 30 mm mélységig $\varnothing 10$ -es átmérőjű és 30 mm mélységtől 142 mm-es mélységig pedig $\varnothing 6H7$ átmérőjű a furat. A 4. furat lépcsőzetes kialakítását a hőmérséklet szenzor alakja indokolja. A három egyforma furat egy $\varnothing 25$ -ös furatkörön helyezkedik el, 120° -os osztásban. Ebbe a három furatba került a 3 fűtőpatron. A 4. furat ugyanazon a furatkörön található 60° -os osztásra az egyik fűtőpatron furatától, ez a furat a hőmérséklet szenzor furata. A központi átmenő furat átmérője $\varnothing 9.55$ mm. Ebbe a furatba kerül a kapilláris és a polimer granulátum.



5. ábra. A megvalósított dugattyú

A dugattyú teljes hossza 255 mm. A terhelő testeket tartó váll átmérője $\varnothing 15$ mm és vastagsága 5 mm. A váll alatti rész vastagsága $\varnothing 8.8$ mm. A dugattyú fejének átmérője $\varnothing 9.47$, míg hossza 6.35 mm. A dugattyú szárára elhelyezett két referenciavonalat egy-egy 0.2 mm mélységű és 0.5 mm vastagságú beszúrással testesíti meg és a szabvány által meghatározott módon került elhelyezésre. A váll feletti rész átmérője $\varnothing 8$ mm. A dugattyú a könnyebb megmunkálhatóság érdekében két különálló alkatrészként készült el. A dugattyú felső részén található egy M6-os menettel ellátott rész, míg az alsó részben pedig található egy M6-os menetelt furat. A két külön álló rész pedig összecsavarható. A dugattyún található alsó és felső referenciavonal között a távolság 30 ± 0.2 mm. A felső referenciavonal a fűtött henger felső lapjával kerül egy vonalba, amikor a dugattyúfej alja és a standard kapilláris teteje között a távolság 20 mm.

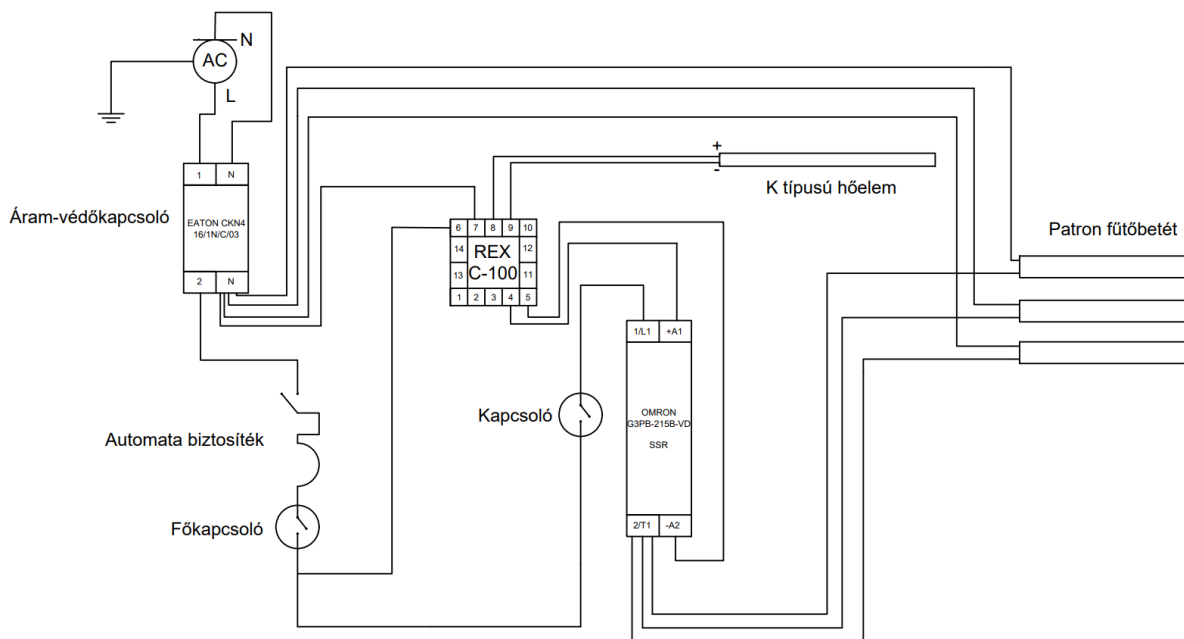
A kapilláris külső átmérője $\varnothing 9.55$ mm, belső átmérője $\varnothing 2.1$ mm és hossza 8 mm. A külső átmérő úgy lett kialakítva, hogy a fűtött henger központi furatába pontosan illeszkedjen. A kapilláris nem szorulhat, mivel tisztítás miatt könnyen eltávolíthatónak kell lenni-e. A nagyon pontos illesztésre azért van szükség, hogy mérés közben a polimer ömledék ne tudjon a kapilláris és a fűtött henger fala közé bekerülni.



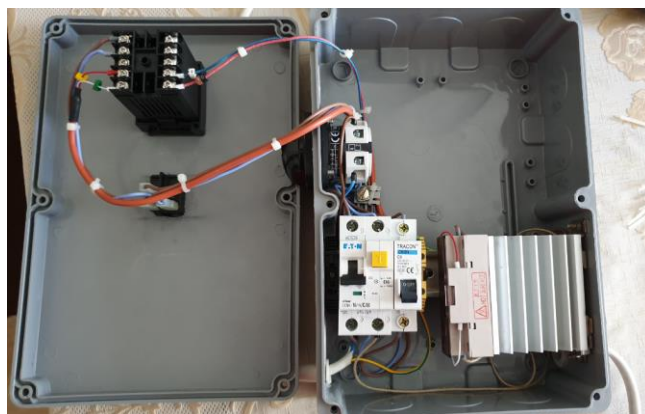
6. ábra. A megvalósított dugattyú

A fűtőpatronok a hengert teljes hosszában melegítik. A fűtőbetét hossza 160 mm és átmérője $\varnothing 6.5$ mm.

A hőmérséklet szabályozását egy PID elven működő REX C-100 típusú hőmérsékletszabályozó valósítja meg. Az alkalmazott hőmérséklet szenzor pedig egy K típusú hőelem. A mérési pontosság $-40^{\circ}\text{C} - +375^{\circ}\text{C}$ között $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$, míg $375^{\circ}\text{C} - 1000^{\circ}\text{C}$ között ± 0.004 szorozva a mért hőmérséklettel. A megfelelő hőszigetelés érdekében a fűtött hengert kerámiaszálaspaplan veszi körbe. A 7. ábrán látható a fűtés és a hőmérsékletszabályozás áramkörének a kapcsolási rajza:



7. ábra. A tervezett berendezés kapcsolási rajza



8. ábra. A vezérlődoboz belseje

A fűtőpatronok és a szabályozó között egy OMRON G3PB-215B-VD típusú SSR (Solid State Relay) relé található. Az SSR relére azért van szükség, mert a szabályozóba beépített relé maximálisan 3A áramerősséget képes átterjeszteni, a 3 fűtőpatron pedig 2.6A áramerősséget vesz fel. A felhasznált SSR relé maximum 15A áramerősséget tud átterjeszteni, ami sokkal biztonságosabb, csökkenti a kiégés veszélyét. A vezérlőt ezért kis feszültségű jel kibocsájtására alkalmas üzemmódban használjuk és a kiadott jel az SSR relét vezérli, amely a jel hatására a fűtőpatronokat a hálózati feszültségre kapcsolja. A relé hálózati táplálása és a hálózat között egy KCD4 típusú kapcsoló található. A kapcsoló szerepe, hogy a fűtés bármikor megállítható vagy elindítható legyen, a relé hálózatról történő leválasztása és visszakapcsolása által. A szálak elvezetése a vezérlődobozig a tartóoszlop belső részében történik, így azok nem akadályozzák a dugattyút mérés közben. Az áramkör tartalmaz egy áram védőkapcsolót, aminek az a szerepe, hogy lekapcsolja az áramkört földzárlat esetén vagy olyankor amikor egy személy megérinti az egyik hálózati feszültség alatt álló alkatrészt.

2.1. Mérési eredmények

A megvalósított kapilláris plasztométerrel az „A” módszer alapján történtek a mérések. Az elvégzett mérések célja, hogy a kapott eredmények által megközelíthető legyen a tervezett kapilláris plasztométer pontossága. A mérésekhez felhasznált polimer előzetesen már tesztelésre került, így ismert annak MFI értéke, de hitelesítéshez nem megfelelő, mivel nem ismertek a mérési körülmények, csak a paraméterek egy része. A berendezés hitelesítése a későbbiekben fog megtörténni. A hitelesítés úgy fog megvalósulni, hogy egy már hitelesített berendezés társaságában mérések kerülnek elvégzésre ugyan olyan körülmények között ugyanazon ember által, így jobban megközelíthető a berendezés valós pontossága. A laboratóriumban meghatározott MFI érték 12.9 g/10 perc, a mérés az ISO 1133-as szabvány alapján történt 230 °C-on és 2.16 kg-os összterheléssel. A vizsgált polimer a Borealis MSC64T20-9502 propilén kopolimer.

A polipropilén alacsony sűrűségű, nagy keménységű, nagy merevségű, nagy kopásállóság, vegyszerállóság és jó ütésállóság jellemzi. [5]

A mérési eredmények táblázata

1.táblázat

1. mérés					
Sorszám	1.	2.	3.	4.	5.
Mért tömeg	0.341 g	0.358 g	0.387 g	0.383 g	0.383 g
Átlagtömeg	0.3704 g				
MFI érték	7.408 g/10 perc				
2. mérés					
Sorszám	1.	2.	3.	4.	5.
Mért tömeg	0.362 g	0.341 g	0.343 g	0.407 g	0.341 g
Átlagtömeg	0.3588 g				
MFI érték	7.176 g/10 perc				
3. mérés					
Sorszám	1.	2.	3.	4.	5.
Mért tömeg	0.362 g	0.350 g	0.326 g	0.363 g	0.399 g
Átlagtömeg	0.36 g				
MFI érték	7.2 g/10 perc				

A mérés során 5 g granulátum került a fűtött hengerbe. Az előmelegítési idő 5 perc volt, míg a mérési hőmérséklet 230 °C és az alkalmazott összerhelés 2.16 kg volt. A két vágás között eltelt idő 30 másodperc volt. A három mérés ugyanazokkal a mérési paraméterekkel történt. A 30 másodperces vágási idő úgy lett megválasztva, hogy a mérés ideje alatt legalább öt minta elkészüljön. Az MFI értékének kiszámítása az (1) képlet alapján történt.

A megvalósított berendezés pontosságát befolyásoló lehetséges tényezők:

- a kritikus alkatrészek (fűtött henger, dugattyú, kapilláris) anyaga és megmunkálása,
- a henger fűtésének, szabványban ajánlottól eltérő, költséghatékony megvalósítása,
- a henger hőmérséklet szabályozásának és ellenőrzésének, szabványban ajánlottól eltérő, költséghatékony megvalósítása,
- a minták tömegének meghatározására felhasznált mérleg pontossága.



9. ábra. A második mérés során készült minták.

3. KÖVETKEZTETÉSEK

A kapilláris plaztométer tervezése és megépítése sikeresnek bizonyult. A teszt mérések során semmilyen konstrukciós probléma nem jelentkezett. A szabványtól történő eltérések miatt azonban a mérési pontossága nem vetekedik egy ipari berendezéssel. Olyan laboratóriumokban vagy környezetben, ahol, nincs lehetőség ipari géppel történő mérésre, a tervezett berendezés által szolgáltatott eredmények egy jó kiindulópontként szolgálhatnak a folyási tulajdonságok meghatározásának érdekében. A berendezés didaktikai célokra is kiválóan alkalmazható. A berendezés pontossága fejlesztések alkalmazásával javítható. A hőmérséklet több ponton történő mérése és szabályozása nagyban javíthatja a pontosságot. A tervezett kapilláris plaztométer teljesen kézi üzemeltetésű, fejlesztési lehetőségként megemlíthető a mérés során elvégzendő feladatok automatizálása. Automatizálható műveletként megemlíthető a minta vágása, az automatikus granulátum adagolás a mérés kezdetén. A dugattyú kézzel pakolható terhelő teste kiválthatóak állítható terhelést biztosító pneumatikus vagy hidraulikus rendszerrel. További fejlesztési lehetőségként megemlíthető még a polimer ömledékek tulajdonságainak további vizsgálatait elősegítő rendszerek implementálása: olvadék sűrűségének mérése, töltőanyag mennyiségének mérése, hőstabilitás vizsgálata.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Pukánszky, B., Móczó, J. *Műanyagok*, Typotex Kiadó, Budapest, **2011**.
- [2] Czvikovszky, T., Nagy, P., Gaál, J. *A polimertechnika alapjai*, Műegyetemi Kiadó, Budapest, **2000**.
- [3] Csutorka, L. *A folyásindex (MFI) nemcsak az ömledék tulajdonságainak mérőszáma*. 1. rész, Műanyagipari szemle **2014/3** szám., Quattroplast kft.
- [4] ISO 1133-1:2011 *Plastics - Determination of the melt mass-flow rate (MFR) and melt volume-flow rate (MVR) of thermoplastics - Part 1: Standard method*
- [5] A polipropilén tulajdonságai.
https://mol.hu/images/mol_hu/pdf/vallalati_ugyfelek/polimer-termekek/termekek/pp-polipropilenek/termekatalogus_pp_2018.pdf

Photophysical Properties and Electronic Structure of Symmetrical Curcumin Analogues and Their BF₂ Complexes, Including a Phenothiazine Substituted Derivative

Gál, E.; Nagy, L.C.

Symmetry 2021, 13, 2299. <https://doi.org/10.3390/sym13122299>

Impaktfaktor: 3,11

Szimmetrikusan szubsztituált kurkumin analógok és ezek BF₂ komplexeinek a fotofizikai tulajdonságai

VASS Dávid-József

david.vass@stud.ubbcluj.ro

Babeş-Bolyai Tudományegyetem, Kémia és Vegyészmérnöki kar

Kivonat

Elektron küldő szubsztituensekkel szimmetrikusan szubsztituált kurkumin származékok szintézise, szerkezetük és fotofizikai tulajdonságaik tanulmányozása, valamint, ezen tulajdonságok alátámasztása elméleti számolásokkal. A BF₂ csoport bevitele a molekula szerkezetébe batokrom eltolódásokat eredményezett, úgy az abszorpciós, mint az emissziós spektrumban, amelyből arra a következtetésre lehet jutni, hogy a komplexek esetében a konjugáció kiterjedtebb mint a kezdeti molekulában. Az előállított vegyületek elméleti számításait DFT és TD-DFT módszerekkel vizsgálták, a stabil geometriákat, valamint a gerjesztési energiákat is beleértve.

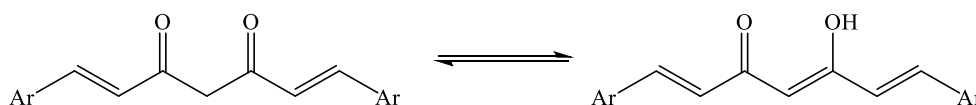
Kulcsszavak: kurkumin, BF₂-kurkumin komplex, szolvatokrómia, fluoreszcencia, DFT/TD-DFT

1. KURKUMINOK SZERKEZETE ÉS SZINTÉZISE

1.1. Szerkezet

A kurkuminok poliaromás, kiterjedt konjugációs rendszerrel bíró molekulák. Az aromás gyűrűket egy telítetlen, β-diketo szénlánc köti össze. Szerkezetmeghatározási vizsgálatok (¹H és ¹³C NMR, DFT számítások) arra engednek következtetni, hogy az egyik karbonil csoport keto-, míg a másik enol-formában van jelen (δ = 5,7-6,5 ppm), ezt a tautomért a kialakuló intramolekuláris hidrogénkötés stabilizálja. ¹H NMR spektrumok tanulmányozásakor, az olefin hidrogén atommagok a telítetlen szénláncban AB spinrendszert alkotnak, J = 15-16 Hz csatolási állandót mutatnak, ami egyértelmű transz geometriára utal. Szimmetrikus kurkuminok szerkezetmeghatározásakor jelentősen kevesebb jellel találkozunk az NMR spektrumban, a szimmetriatengely két oldalán található azonos kémiai környezet miatt.

A keto-enol tautomériára (1. ábra) a környezeti tényezők hatással vannak (pl. oldószer, hőmérséklet, pH stb.). Az abszorpciós és emissziós spektrumokból arra lehet következtetni, magasabb hőmérsékleten és alacsonyabb pH-n inkább a keto-, míg alacsonyabb hőmérsékleten, bázikus közegben az enol-tautomér kialakulása felé tolódik el az egyensúly. Apoláros oldószerekben (pl. hexán) inkább a keto-, míg poláros aprotikus oldószerekben az enol-forma is jelen van, amit a két abszorbancia maximum jelenléte is alátámaszt.



1. ábra. A kurkuminok keto-enol tautomériája

A DFT és TD-DFT számítások alapján, ha a láncvégi gyűrűs elágazások nem teszik lehetővé a konformerek kialakulását, akkor a molekula síkszerkezetet vesz fel. Abban az esetben ha a gyűrűs elágazás több konformerrel is rendelkezik, akkor a lehető legkisebb energiájú szerkezet lesz jelen, és ezek a szubsztituensek egymáshoz

viszonyítva a lehető legtávolabb vannak (pl. a fenotiazin pillangó konformációja a belőle származtatott vegyületben).

1.2. Kurkuminok szintézise

A kurkuminok és származékai előállíthatóak a 2,4-pentadion és benzaldehid (vagy más heterociklusos analóg) vegyületeinek aldol kondenzációjával, bázis jelenlétében. Ha egyféle aromás aldehidet használunk, szimmetrikusan szubsztituált kurkuminhoz jutunk, ha két különbözőt, akkor nem szimmetrikus termék is keletkezik. Utóbbit csak kisebb hozammal lehet előállítani, mert az oszlopkromatográfiás eljárást többször kell megismételni, a megnövekedett számú melléktermékek miatt.

Ahhoz, hogy az új csoport ne *mezo*-pozícióba kapcsolódjon be, az acetyl-acetont szükséges enol-formában tartani. A Palvini-féle módszer szerint, bázisként egy alifás aminoszolgát, míg a komplexképzést bór-trioxiddal valósítják meg; a keletkező víz megkötéséhez pedig bórsav-észtert alkalmaznak, ami meggátolja a koordinatív vegyület szétesését. Egy másik lehetőség a bór-trifluoriddal történő komplexálás, azonban ez időigényes.

2. A KURKUMINOK KOMPLEXKÉPZŐ HAJLAMA: BÓRKOMPLEXEK KIALAKULÁSA, ELŐÁLLÍTÁSA ÉS SZERKEZETÜK TANULMÁNYOZÁSA

2.1. Az előállított vegyületek szerkezetének a tanulmányozása

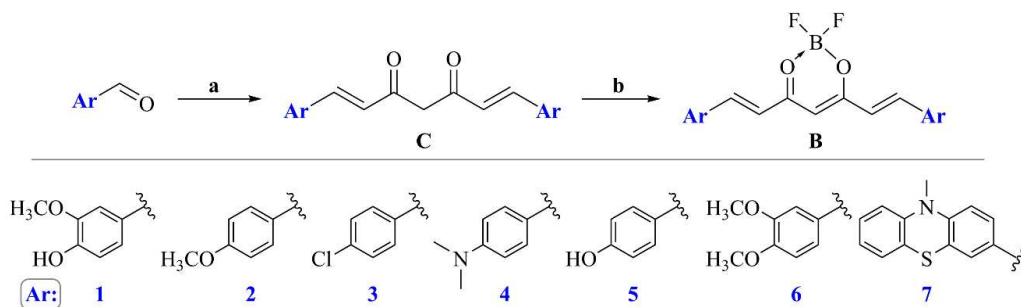
A β -diketo csoport révén a kurkuminok számos fémmel és félfémmel koordinatív vegyületet képeznek. Az enolat anion egy polidentált ligandum, ugyanis egyik nemkötő elektronpárjával a ketocsoport sp^2 hibridálaptú oxigénatomja is részt vesz a koordinatív vegyület kialakításában. Az elektronhiányos bór-trifluoriddal négyes koordinációs számú kelátot hoz létre.

1H NMR mérések egyértelmű szerkezeti jellemzőkre világítanak rá. A bórkomplexek spektrumaiban megtalálhatóak a transz geometriára utaló csatolási állandók ($J = 15-16$ Hz), tehát a kelátképzés nem változtatja meg a ligandum geometriáját. A *mezo*-helyzetű metilénecsoport kémiai eltolódásának az értéke enyhén nagyobb tartományban jelentkezik, amit a BF_2 koordinatív centrum jelenléte okoz, viszont az enol-formára utaló intervallumon belül helyezkedik el. ^{13}C NMR méréskor, az enol-formában a *mezo* helyzetű metilén csoport szénatomja $\delta = 101$ ppm-nél jelentkezik, míg a keto tautomérben ez az érték 56 ppm. Minél nagyobb az aromás gyűrűk elektronküldő jellege (pl. fenotiazin), a ^{19}F NMR spektrumban a jel annál kisebb tartományba tolódik el (benzolszármazékok esetében ez kb. -140 ppm körüli érték, viszont fenotiazin esetében -150,8 ppm).

A DFT és TD-DFT számítások azt mutatják, a BF_2 -csoport nem koplánáris a ligandummal, hanem a molekula síkjára merőlegesen helyezkedik el.

2.2. Bórkomplexek szintézise

A BF_2 -komplexek előállíthatóak az előbb említett Rao-féle szintézissel is, de létezik egy ennél egyszerűbb és gyorsabb módszer (2. ábra, a). A szintetizált kurkumin dietil-éteres oldatához $Et_2O \cdot BF_3$ -ot adunk, majd az így kapott elegyhez ecetsav anhidridet adagolnak, miközben a hőmérséklet $0^\circ C$ alatt tartjuk az elegy hőmérsékletét. A kelátképződés egy egyensúlyi folyamat, melléktermékként hidrogén-fluorid keletkezik, ami elreagál az anhidriddel, így növelhető a szintézis hatékonysága.



2. ábra. A BF_2 -komplexek szintézise (a) 2 eq. aromás aldehid, acetylacetone, B_2O_3 , $i-PrNH_2$, $B(Oi-Pr)_3$, $EtOAc$ (b): $BF_3 \cdot Et_2O$, $(CH_3CO)_2O$, Et_2O , $-5^\circ C$, 24h

3. KURKUMINOK ÉS SZÁRMAZÉKAINAK OPTIKAI TULAJDONSÁGAI: KURKUMINOK ÉS BÓRKOMPLEXEIK ABSZORPCIÓS ÉS EMISSZIÓS SPEKTRUMA, HOMO, ILLETVE LUMO PÁLYÁK MODELLEZÉSE

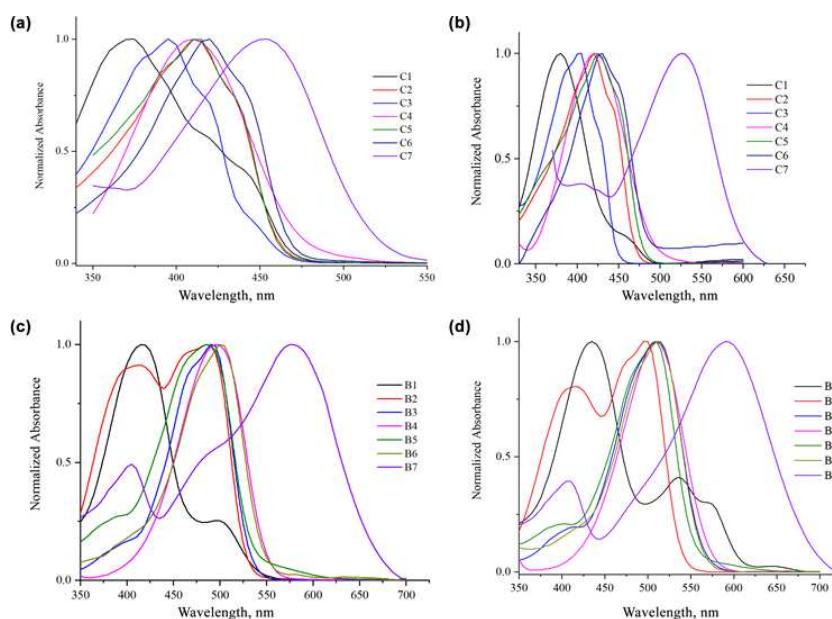
3.1. Kurkuminok

A kurkuminok kiterjedt konjugációs rendszere a telítetlen diketo-csoportnak, illetve a két aromás elágazásnak köszönhető. Mind az abszorpciós, úgy az emissziós spektrumok látható tartományon belül találhatóak, ami kis gerjesztési energiát feltételez. Elektronküldő csoportokkal ez az energia csökkenthető, amit az abszorbancia spektrumok batokróm eltolódása is mutat (egy fenil-metil-éter és fenotiazin-származék közötti különbség kb. 55 nm). Az oldószer nem csak a molekulával kialakított London-féle kölcsönhatásokkal torzítja az elektronfelhőt, hanem hatással van az atomok kötésmódjára is (lásd. keto-enol tautomeria). Ebből kifolyólag különböző polaritású oldószerben mért abszorpciós spektrumokban jelentős különbség figyelhető meg. Apoláros oldószerben, a keto-tautomer van jelen, az abszorpciós spektrum hipszokróm eltolódást mutat, míg poláros oldószerben az enol forma a kedvezőbb, így az abszorbanciás maximum nagyobb hullámhossznál jelentkezik.

A DFT és TD-DFT számítások ugyanezen konklúzióra vezetnek. A kurkuminok HOMO pályái inkább az aromás gyűrű felé orientálódnak, míg a LUMO pályák nagyrészt a telítetlen szénláncon találhatóak meg. A két állapot közötti energia az aromás láncrész elektronküldő készségének növekedésével fordítottan arányosan változik. Az elektronszívó csoportok elektronban szegényítik a konjugációs rendszert, ezért nagyobb energiabefektetéssel jár a gerjesztett állapotot elérni (pl. klórtartalmú benzol- és a fenotiazin származék között kb. 1 eV a gerjesztési energia különbség). Az abszorpciós spektrumok szintén ezt a tézist támasztják alá: gázfázisban a fenotiazin-tartalmú kurkumin gerjesztési hullámhossza 92 nm-rel nagyobb, mint a klórt tartalmazó vegyületé. Az oldószerhatás a számolt spektrumokban is megnyilvánul, ugyanis acetóban pár nm-rel kisebb a számított hullámhossz, mint DMSO-ban.

3.2. Az előállított bórkomplexek optikai tulajdonságai

A bórtrifluoriddal történő komplexálás az abszorpciós spektrum batokróm eltolódását eredményezi, ahogyan az elektronküldő aromás rendszerekből álló (fenotiazin, 2-hidroxi-fenilmetil-éter) kurkuminok Stokes-féle eltolódása is jelentős növekedést mutat. Ez azzal indokolható, hogy a BF_2 koordinatív centrum jelenléte enol-formába kényszeríti a kurkumint, illetve merevíti a ligandum szerkezetét (3. ábra).



3. ábra. C1–C7 vegyületek normalizált abszorpciós spektruma, szobahőmérsékleten acetóban (a) és DMSO-ban (b); B1–B7 vegyületek normalizált abszorpciós spektruma, szobahőmérsékleten acetóban (c) és DMSO-ban (d) ($\sim 10^{-5}$ M koncentráció).

A molekula orbitálok modellezése azt mutatja, hogy nyugalmi állapotban az elektronok nagyobb valószínűséggel találhatók meg az aromás rendszerben, mint a kelát gyűrűben, viszont a LUMO pályák inkább a koordinatív centrumhoz tömörülnek. A bórral történő komplexálás egyértelműen megváltoztatja a kurkumin HOMO modelljét, ugyanis a telítetlen lánc keto csoportjain az orbitálok mérete jelentősen csökken. A HOMO-LUMO orbitálok közötti energiakülönbség kb. 0,3 eV-tal kisebb, mint a nem komplexált molekuláé. Ezt igazolják a gázfázisban számított abszorpciós spektrumok is, amik kb. 30 nm-rel nőttek a kiindulási vegyülethez viszonyítva. Az aromás gyűrűk elektronküldő sajátosságai továbbra is szerepet játszanak: a fenotiazin származék és bórkomplexe közötti abszorpciós hullámhossz-különbség 61 nm, míg a klórbenzol-származék esetén ez az érték 22 nm.

4. KÖVETKEZTETÉSEK

A kurkuminok kiterjedt konjugációs rendszere és enol-keto tautomériája jelentős optikai tulajdonságokat kölcsönöz a vegyületcsoportnak. Ha az aromás gyűrű lehetővé teszi, a molekula a legkisebb energiájú konformációban lesz, és ha ez nem valósulhat meg, akkor síkszerkezetet vesz fel. Az aromás gyűrűk elektronküldő jellege nagyban befolyásolja a molekula gerjesztési energiáját, ami az abszorpciós maximum értékében, illetve a számított HOMO és LUMO pályák közötti energia különbségben is megnyilvánul. Enol-formában a kurkuminok képesek fémekkel és félfémekkel koordinatív vegyületeket kialakítani, ami növeli a molekula merevségét, így a gerjesztési energia csökken. Ha a ligandum elektronküldő aromás elágazással rendelkezik, a komplexálás növeli a Stokes-féle eltolódás mértékét. A jövőben további kutatások szükségesek arról, hogy a *mezo* helyzetbe csatolt aromás rendszerek elektronküldő effektusa miként befolyásolja a kurkuminok optikai tulajdonságait.

5. VÁLOGATOTT IRODALMI HIVATKOZÁSOK

1. Canard, G.; Ponce-Vargas, M.; Jacquemin, D.; Le Guennic, B.; Felouat, A.; Rivoal, M.; Zaborova, E.; D'Aléo, A.; Fages, F. *Influence of the electron donor groups on the optical and electrochemical properties of borondifluoride complexes of curcuminoid derivatives: A joint theoretical and experimental study.* RSC Adv. **2017**, 7, 10132–10142.
2. Bai, G.; Yu, C.; Cheng, C.; Hao, E.; Wei, Y.; Mu, X.; Jiao, L. *Syntheses and photophysical properties of BF₂ complexes of curcumin analogues.* Org. Biomol. Chem. **2014**, 12, 1618–1626.
3. Margar, S.N.; Rhyman, L.; Ramasami, P.; Sekar, N. *Fluorescent difluoroboron-curcumin analogs: An investigation of the electronic structures and photophysical properties.* Spectrochim. Acta A Mol. Biomol. Spectrosc. **2016**, 152, 241–251.
4. Weiss, H.; Reichel, J.; Görls, H.; Schneider, K.R.A.; Micheel, M.; Pröhl, M.; Gottschaldt, M.; Dietzek, B.; Weigand, W. *Curcuminoid-BF₂ complexes: Synthesis, fluorescence and optimization of BF₂ group cleavage.* Beilstein J. Org. Chem. **2017**, 13, 2264–2272.
5. Felouat, A.; D'Aléo, A.; Fages, F. *Synthesis and photophysical properties of difluoroboron complexes of curcuminoid derivatives bearing different terminal aromatic units and a meso-aryl ring.* J. Org. Chem. **2013**, 78, 4446–4455.
6. Laali, K.K.; Rathman, B.M.; Bunge, S.D.; Qi, X.; Borosky, G.L. *Fluoro-curcuminoids and curcuminoid-BF₂ adducts: Synthesis, X-ray structures, bioassay, and computational/docking study.* J. Fluor. Chem. **2016**, 191, 29–41.
7. Tomasi, J.; Mennucci, B.; Cammi, R. *Quantum mechanical continuum solvation models.* Chem. Rev. **2005**, 105, 2999–3093.