



MAGYAR AGRÁR- ÉS
ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM

POLIMER FOGASKERÉKPÁROK TRIBOLÓGIAI VISELKEDÉSÉNEK ÉRTÉKELÉSE
HAGYOMÁNYOS ÉS XCT TECHNOLÓGIÁVAL

DOI: 10.54598/003820

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Odrobina Miklós

Gödöllő
2023

**A doktori iskola
megnevezése:** Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága: Agrárműszaki Tudományok

vezetője: Prof. Dr. Kalácska Gábor
egyetemi tanár, DSc
MATE
Műszaki intézet

Témavezető: Prof. Dr. Kalácska Gábor
egyetemi tanár, DSc
MATE
Műszaki intézet

Társ-témavezető: Dr. Keresztes Róbert Zsolt
egyetemi docens, PhD
MATE
Műszaki intézet

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
A témavezető(k) jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSJEGYZÉK.....	3
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK.....	4
1.1. A téma időszerűsége és jelentősége.....	4
1.2. Célkítűzések.....	4
2. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	5
2.1. Anyagvizsgálati módszerek.....	5
2.2. Fogaskerék-vizsgálatok.....	6
2.3. Fogaskerékkopás-vizsgálatok.....	7
2.4. Függvényillesztés, kiugró adatok szűrése és többváltozós lineáris regresszió.....	9
3. EREDMÉNYEK.....	10
3.1. Az öntött PA 6 kiválasztási folyamata.....	10
3.2. A fogaskerék-vizsgálatok eredményei.....	11
3.3. A fogaskerékkopás-vizsgálatok eredményei.....	13
4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....	17
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....	18
6. ÖSSZEFOGLALÁS.....	19
7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK.....	20

JELÖLÉSJEGYZÉK

<i>A</i>	fogtó hőmérsékletét leíró függvény együtthatója	[-]
<i>B</i>	fogtó hőmérsékletét leíró függvény együtthatója	[-]
<i>C</i>	fogtó hőmérsékletét leíró függvény együtthatója	[-]
<i>DSC</i>	differenciális pásztázó kalorimetria	[-]
<i>k_wtömeg</i>	tömegvesztés alapján számított kopási együttható	[10 ⁻⁶ mm ³ /Nm]
<i>k_wW_m</i>	mikroszkópia alapján számított kopási együttható	[10 ⁻⁶ mm ³ /Nm]
<i>m_w</i>	fogaskerék tömegvesztése	[g]
<i>N_L</i>	terhelési ciklusok száma	[-]
<i>PA12</i>	poliamid 12	[-]
<i>PA6</i>	poliamid 6	[-]
<i>PEEK</i>	poliéter-éter-keton	[-]
<i>p_v</i>	a felületi nyomás és a csúszási sebesség szorzata	[MPa m/s]
<i>SLS</i>	szelektív lézer szinterezés	[-]
<i>v</i>	átlagos csúszási sebesség	[m/s]
<i>VDI</i>	Verein Deutscher Ingenieure	[-]
<i>W_m</i>	átlagos lineáris kopás	[mm]
<i>XCT</i>	röntgen tomográfia (X-ray Computed Tomography)	[-]

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

1.1. A téma időszerűsége és jelentősége

A fogaskereket, mint erő és mozgás átvitelére alkalmas gépelemet már az ókorban ismerték és használták. Az anyagtudomány fejlődésével, azonban új aspektusok kerültek felszínre egy olyan régi műszaki megoldás kapcsán is, mint a fogaskerék. A műanyag fogaskerekeket mintegy 70 éve kezdték el alkalmazni, azonban eleinte teljesen háttérbe szorultak a fémekkel szemben, mivel anyagtulajdonságaik miatt kizárólag kis terhelésű körülmények között voltak alkalmazhatók. A műszaki műanyagok térhódítása az elmúlt 30 évben, viszont szemléletváltást hozott, és ezt nem is mutatja más jobban, mint a műanyag fogaskerekek témájában megjelenő cikkek száma.

A műanyag fogaskerekek gyártása és felhasználása mára vetekszik a fém kerekek számával, ami előnyös tulajdonságaiknak köszönhető, és már az ipar számos területén megtalálhatók. Ilyen az autóiipar, az irodai gépek és háztartási eszközök, az élelmiszer- és textilipari gépek, a repülőipar és az orvostudomány. A fém fogaskerekekhez képest, amelyek kémiai korrózióval, kenéssel kapcsolatos meghibásodásokkal és drága gyártási, üzemeltetési és karbantartási költségekkel járnak, a műanyag fogaskerekek súlya jelentősen kisebb, így a forgás közben ébredő tehetetlenségi erők is kedvezőbbek, alacsony a mozgás ellenében ható súrlódási együtthatójuk. Ezenfelül önkenő tulajdonsággal is rendelkezhetnek, futásuk alacsonyabb zajszintet kelt, csillapítási képességüknek köszönhetően a dinamikus igénybevételeket jól viselik, és jóval kedvezőbb áron gyárthatók le akár kis vagy nagy mennyiségben is.

A műanyag fogaskerekek felhasználását a nem-lineáris anyagtulajdonságok nehezítik meg. A fogaskerekek érintkezése közben fellépő csúszás hőfejlődést okoz, ami a polimerek viszkoelasztikus viselkedése miatt a mechanikai tulajdonságok romlásához és nagymértékű nyúláshoz vezet. Ez jelentős hatással van a műanyagok teljesítményére. Ezen bonyolult folyamatok tudatában a polimerek anyagjellemzőinek meghatározása kihívást jelent, ami nélkül a hajtáselemek pontos számításait lehetetlen elvégezni. Figyelembe kell venni olyan tulajdonságokat, mint például: kifáradási határ, mechanikai-termikus viselkedés, tribológiai jellemzők, ami a fogaskerékpárok súrlódási és kopási mechanizmusait jelenti.

Kutatási és ipari területen a műanyag fogaskerekekre vonatkozó tervezési szabvány nem létezik. Jelenleg a fém fogaskerekek szabványából a németek által átdolgozott VDI 2736 irányelv használatos, amely csupán néhány anyagpárosítás esetén tartalmaz anyagjellemzőket a kifáradási határra (Wöhler görbe), a hőmérsékletre, a tribológiai jellemzőkre vonatkozólag a pontos fogaskerék számításokhoz.

Ezzel szemben ma már rendelkezésre állnak nagyteljesítményű műszaki műanyagok, sőt az additív gyártástechnológia is a hétköznapi részévé vált. A műanyag fogaskerekek tervezéséhez szükséges anyagjellemzők, viszont nem érhetők el. A kutatók feladata, hogy a közeljövőben meghatározzák ezen új műanyagokra vonatkozó mechanikai, termikus, kifáradási és tribológiai jellemzőket annak érdekében, hogy a fogaskerekek tervezése pontosan elvégezhető legyen és teljesítményüket optimalizálni tudjuk.

1.2. Célkitűzések

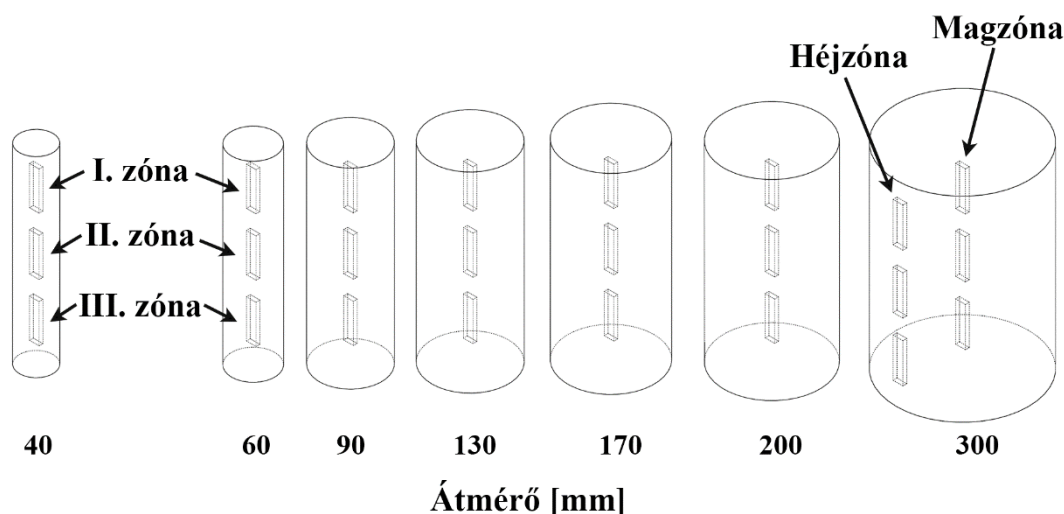
Doktori kutatásom fő célkitűzése a szelektív lézer szinterelés (SLS) technológiával, valamint féltermékből, hagyományos fogazási eljárással készült polimer fogaskerékpárok termikus és tribológiai jellemzőinek meghatározása. További célom olyan regressziós modellek létrehozása, amelyek alkalmasak a bemenő paraméterek változásának függvényében a fogaskerekek egyensúlyi hőmérsékletének, súrlódási és kopási együtthatójának a becslésére. Ezeket felül célként tűztem ki a fogaskerék kopás értékelését tömegméréssel, mikroszkópiával és röntgen tomográfiával, valamint az alkalmazott kopásértékelési eljárások összehasonlítását. Kutatási céljaim közé tartozik még a fogaskerék alapanyagként elterjedt magnézium katalizálású öntött poliamid 6 féltermékek szívósságának feltárása.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

2.1. Anyagvizsgáló módszerek

A magnézium katalizálású öntött poliamid 6 gyártástechnológiája jól szabályozott folyamat. Ennek ellenére az öntés során lejátszódó exoterm kémiai folyamat egyik hátránya, hogy az öntött rudak külső és belső része között hőmérséklet különbség alakul ki, ami hatással van a keletkező anyag mechanikai tulajdonságaira.

A magnézium katalizálású öntött poliamid 6-nál az átmérő hatását az anyag szívósságára több vizsgálati eljárás elvégzésével értékeltem ki 40mm és 300mm közötti átmérő tartományban. A vizsgálatokhoz szükséges próbatesteket a rudakból forgácsolási eljárással alakítottam ki, aminek vázlatos bemutatása az 1. ábrán látható. Első körben Charpy-féle ütővizsgálatot hajtottam végre. Ezt követően az ütőmunka eltéréseinek okára kerestem választ differenciális pásztázó kalorimetriával (DSC).



1. ábra A próbatestek elhelyezkedésének vázlatos bemutatása

A Charpy-féle ütővizsgálatokat a QuattroPlast Kft. laboratóriumában található INSTRON CEAST 9050 ütőinga készülékkel hajtottam végre az MSZ EN ISO 179 szabvány szerint, szobahőmérsékleten (23 °C). A mérésekhez használt üllő támasztávolsága 62mm. A kalapács energiája 1 Joule, az ütés sebessége pedig 3 m/s.

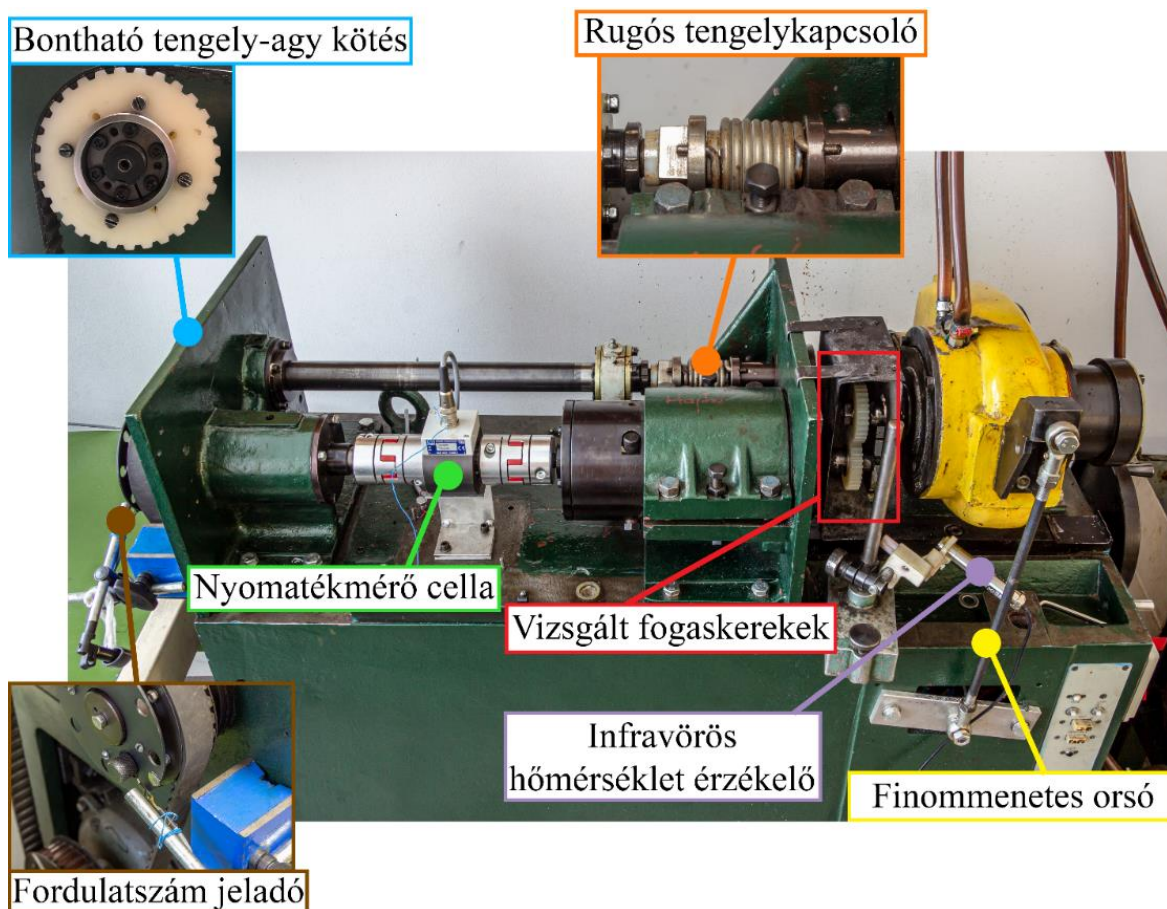
A poliamid 6 kristályosodását és olvadási viselkedését egy METTLER TOLEDO DSC 1 Star eSystem mérőberendezéssel vizsgáltam a budapesti Robert Bosch Kft. budapesti telephelyén. A DSC vizsgálatokhoz felhasznált mintákat közvetlenül a Charpy próbatestekből vágtam ki. A vizsgálati program szerint a minták először -10 °C-ról 290 °C-ra lettek melegítve, majd vissza lettek hűtve -10 °C-ra mindezt folyamatos nitrogénáramoltatás mellett. A hűtési és melegítési sebesség 10 °C/perc.

Ennek a kutatásnak azért van nagy jelentősége, mert a PA6 féltermékből számos funkcionális alkatrészt, gépelemet készítenek forgácsolási eljárással, többek között fogaskerekeket, amelyek mechanikai igénybevételnek vannak kitéve, azonban ezek élettartama, tartóssága erősen függ az anyag tulajdonságaitól. Ezzel szemben tudomásunk van arról, hogy a gyártási mérettartományon belül a kristályosodási fok széles skálán mozog, ezért fontos tisztázni, hogy milyen mérettartományból történik a fogaskerekek gyártása. Mivel teljesen más tulajdonságokkal fognak rendelkezni a szívósság és teherbírás tekintetében attól függően, hogy 60 vagy 300 mm-es átmérőjű rúdból készülnek a fogaskerekek. Ezért kutatási célkitűzéseim első fejezete az öntött poliamidokhoz kapcsolódóan ennek a bizonytalanságnak a tisztázása, előkísérletek elvégzésével.

2.2. Fogaskerék-vizsgálatok

A kutatáshoz felhasznált alapanyagok különböző módon érhetők el. A 3D nyomtatáshoz használt PA12 por formájában vásárolható meg, ami kizárólag csak SLS technológiájú 3D nyomtatókhoz használható fel. Az öntött PA6 és az extrudált PEEK kereskedelmi forgalomban kapható féltermékként, ami alatt tábla vagy rúd kialakítást értünk. A vizsgálandó fogaskerekeknek megfelelően Ø70x1000 mm-es rudakat vásároltam mind a két anyagból, majd forgácsolási eljárással, több lépcsőben gyártottam le a fogaskerekeket.

A műanyag fogaskerék kísérletekhez vizsgálóberendezést fejlesztettem, amely alkalmas hosszútávú élettartamtesztek, terhelhetőség, kopás és egyéb vizsgálatok elvégzésére üzemi körülmények között (2. ábra). A fogaskerékvizsgáló-berendezés a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem Műszaki Intézet gödöllői tanműhelyének tribológiai laboratóriumában található.



2.2. ábra Műanyag fogaskerék-vizsgálóberendezés

A zárt hajtásláncban ébredő nyomatékot – beleértve a terhelő rugó és a rendszer veszteségeiből kialakuló nyomatékot – a beépített HBM T22 típusú nyomatékmérő szenzor érzékeli, amelynek névleges mérési tartománya ± 50 Nm, pontossági osztálya: 0.5. A fogaskerekek fordulatszámát egy Hall-jeladó észleli. A fogaskerekek hőmérsékletének mérése egy Calex által gyártott PyroCouple PC CF MT – 0 típusú közeli fókuszú, érintésmentes infravörös hőmérséklet érzékellel történik, amelynek mérési tartománya $0^{\circ}\text{C} - 250^{\circ}\text{C}$, pontossága $\pm 1\%$ vagy $\pm 1^{\circ}\text{C}$ attól függően, amelyik a nagyobb, valamint látómezője Ø5 mm 100 mm-es távolságon. Az érzékelők kimeneti jeleit egy HBM Spider 8 típusú mérési adatgyűjtő rögzíti.

A kutatásom során közvetlenül a fogtő alatti részen mértem a hőmérsékletet, mivel ezen a területen a hőmérséklet stabilabban mérhető, mint az érintkezési felületen, valamint a megfelelő számítási metódus ki van rá dolgozva.

A fogaskerék vizsgálatok mérési beállításait és feltételeit a 1. táblázatban foglaltam össze. A kísérleteket azonos fogaskerék geometriával, azaz 1:1 áttétellel végeztem el száraz, kenetlen üzemi körülmények között, és minden esetben azonos anyagból készült fogaskerekeket járatam együtt.

1. táblázat A mérési beállítások és feltételek

	Anyag	Terhelési szintek		
		1.	2.	3.
Alkalmazott terhelések (M) [Nm]	PA12	1,25	1,8	2,5
	PA6	3,5	5,3	7
	PEEK	5	7,5	10
Fordulatszám (n) [min ⁻¹]		1000		
Osztóköri kerületi sebesség (v _{ker}) [m/s]		3,14		
Ciklus (N) [x10 ⁶ fordulat]		1,5		
Üzemi környezet		Levegő		
Hőmérséklet (T _{kör})		23±2°C (klimatizált helyiség)		
Páratartalom		50 ± 10 %		

Az egymáson elmozduló műanyag gépelemeknél, mint például a siklócsapágy, a tervezésnél a számítások alapjául szolgál a felületi terhelés és a csúszási sebesség szorzata, ami $p v$ értéként ismert. Ezért a dolgozatomban a kopási jellemzők mellett a hőmérsékletet és a súrlódási tényezőt szintén vizsgálom a $p v$ érték függvényében.

2.3. Fogaskerékkopás-vizsgálatok

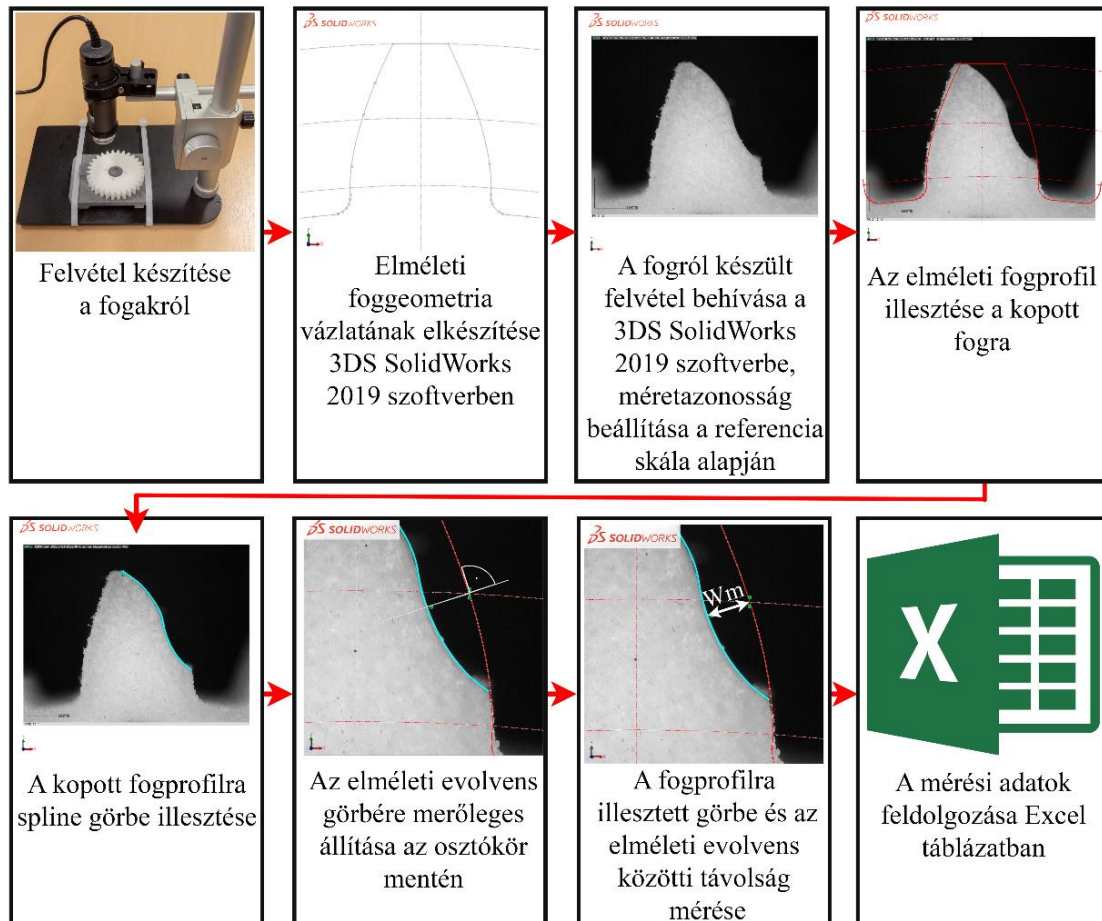
A fogaskerekek kopásának értékelésére két különböző mérési módszert dolgoztak ki. Az egyik a tömegmérésen, a másik pedig a fogprofil alakváltozásának nyomon követésén alapszik. Ezeknek az eljárásoknak az alkalmazásával határozható meg a kopási együttható, amelyre külön módszertanok ismertek. A hagyományos kopásértékeléseket kiegészítve röntgen tomográfiai vizsgálati metódust dolgoztam ki annak érdekében, hogy további részleteket tudjunk meg a fogaskerekek kopási mechanizmusáról.

A fogaskerekek kopás értékelésének hagyományos és legegyszerűbb módszere a tömegmérés, amelyhez analitikus mérleget használnak. A tömegvesztéses kopási együttható $k_{wtömeg}$, amelyet a VDI 2736-os irányelv szerint lehet meghatározni. Ehhez a módszertanhoz, az ép és a kopott fogaskerék tömegének a különbségét, az m_w -t kell kiszámítani.

A fogaskerék kopása grafikus módon is kiértékelhető mikroszkóp segítségével. A fogaskerék vizsgálatot követően a kopott fogaskerék fogprofiljáról készített felvétel alapján megbízhatóan mérhető a lineáris kopás, W_m , azaz a fog elvékonyodása az osztókör vonalában. A W_m érték felhasználható a kopási tényező, k_{wwm} kiszámítására a VDI 2736 alapján. A kutatásom során a lineáris kopást az elméleti profil és a kopott profil összehasonlítása által határoztam meg. A mikroszkópos kopásértékelés folyamatát a 3. ábrán foglaltam össze.

A röntgen tomográfia alkalmas 3 dimenziós térfogati felvételek létrehozására, és lehetőséget nyújt összetett külső és belső geometriai jellemzőkkel rendelkező alkatrészek mérésére és jellemzésére, amit a hagyományos metrológiai műszerekkel nehezen vagy egyáltalán nem lehetséges elvégezni.

A műanyag fogaskerekek fogfelületének, kopásának leképezésére is alkalmas a számítógépes röntgen tomográfia (XCT, X-ray Computed Tomography), azonban kevesen alkalmazzák magas költsége és elterjedtségének hiánya okán. A fogaskerekek kopásértékelésénél a 3 dimenziós tomográfia előnyt jelent a többi kopásértékelő eljárással szemben, mivel nem csak a szélső pontok esetén kapunk információt a fogprofilról, hanem a teljes fogoldal mentén tudjuk vizsgálni annak alakulását.

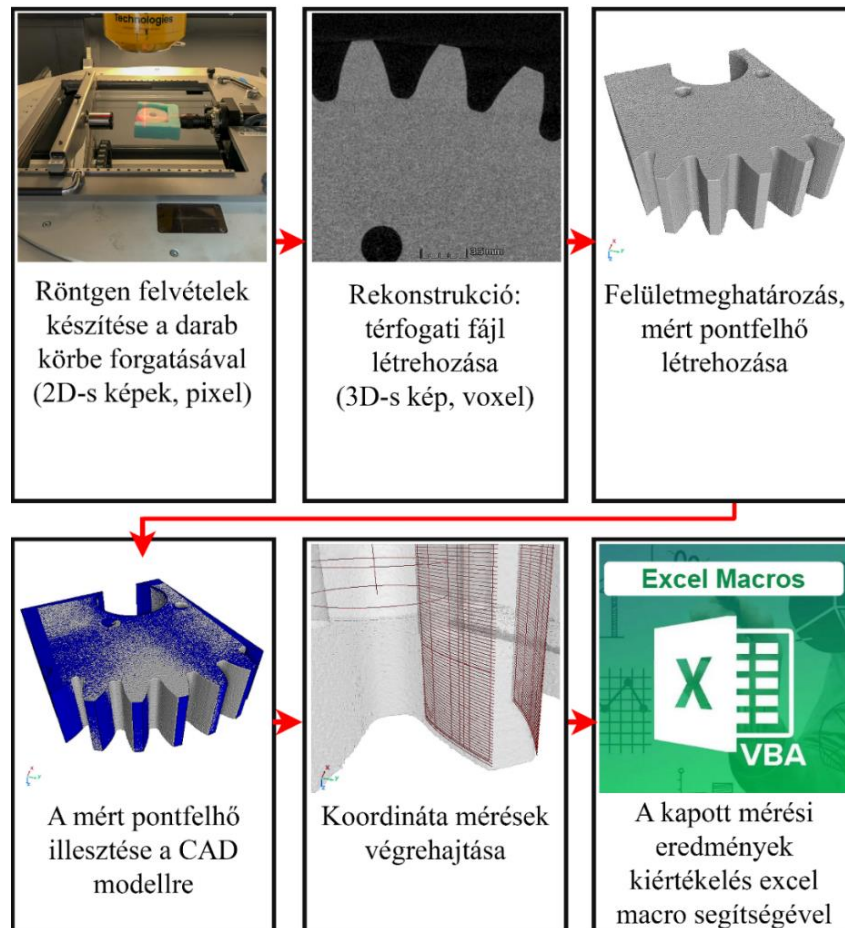


3. ábra A mikroszkópos kopásértékelés folyamatábrája

Az XCT felvételeket egy GE Phoenix Micromex berendezéssel állítottam elő, ami digitális sík panel detektorral és egy 180 kV, 20W transzmissziós röntgen csővel van felszerelve. A felvételeket minden fogaskerék minta esetén ugyanazzal a beállítással készítettem, amelyek a 2. táblázatban vannak összefoglalva. A képek rekonstrukcióját Phoenix Datasx 2 programmal végeztem el. A CT felvételek VGStudio MAX 3.4-gyel való kiértékelése során egyedi módszereket dolgoztam ki. A röntgen tomográfiával végzett kopásértékelés folyamatát a 4. ábrán mutatom be.

2. táblázat GE Phoenix Micromex 180kV mérési beállítások

Paraméter	Érték	Paraméter	Érték
Szűrő anyaga	Réz	Expozíciós idő	333 ms
Szűrő vastagsága	1,8 mm	Voxel méret	46,18 μ m
Csőfeszültség	50 kV	Vetületek száma	360
Csőáram	300 μ A	Detektor mérete	1000 x 1000 pixel



4. ábra Röntgen tomográfias kopásértékelés folyamatábrája

2.4. Függvényillesztés, kiugró adatok szűrése és többváltozós lineáris regresszió

A mérési adatsorok feldolgozásánál több matematikai eljárást is alkalmaztam, amelyeket az Origin 2023b szoftverben végeztem el.

A kiugró mérési adatok felismerésére és kizárására a „Residual Plot” funkciót használtam. Ezen eljárás során az adatsorok esetében lineáris regressziót végeztem, és a standard maradékok segítségével határoztam meg, hogy mely adatpontok számítanak kiugró értékeknek.

A függvényillesztést megelőzően a hőmérséklet adatsorok feldolgozásánál egy jól bevált módszert, a Savitzky-Golay-féle algoritmust használtam elsőfokú polinommal, vagyis lineáris függvénnyel és 500 pont szélességgel a zajos mérési adatok simítására, ami csökkentette a görbék egyenetlenségeit.

A fogaskerék-vizsgálatoknál az egyensúlyi hőmérséklet meghatározásához diagramokat készítettem, ahol a hőmérsékletet a ciklus függvényében ábrázoltam. A hőmérséklet görbét két szakaszra bontottam tribológiai elvek szerint, és az egyensúlyi hőmérsékletet a bejáratási szakaszban vizsgáltam. A hőmérséklet görbe ezen szakaszaira exponenciális típusú telítődési függvényt illesztettem, amely során a Downhill Simplex (Nelder-Mead) módszert alkalmaztam.

A kutatásom során kapott nagyszámú mérési adatok matematikai statisztikai értékelésére többváltozós lineáris regressziót alkalmaztam annak érdekében, hogy megállapítsam a kristályosság hatását az alapkutatásnál alkalmazott anyag Charpy ütőmunkájára, valamint a fogaskerék vizsgálatokhoz felhasznált anyagok tulajdonságainak és a vizsgálat jellemzőinek a hőmérsékletre és a kopásra gyakorolt hatását és azok érzékenységét.

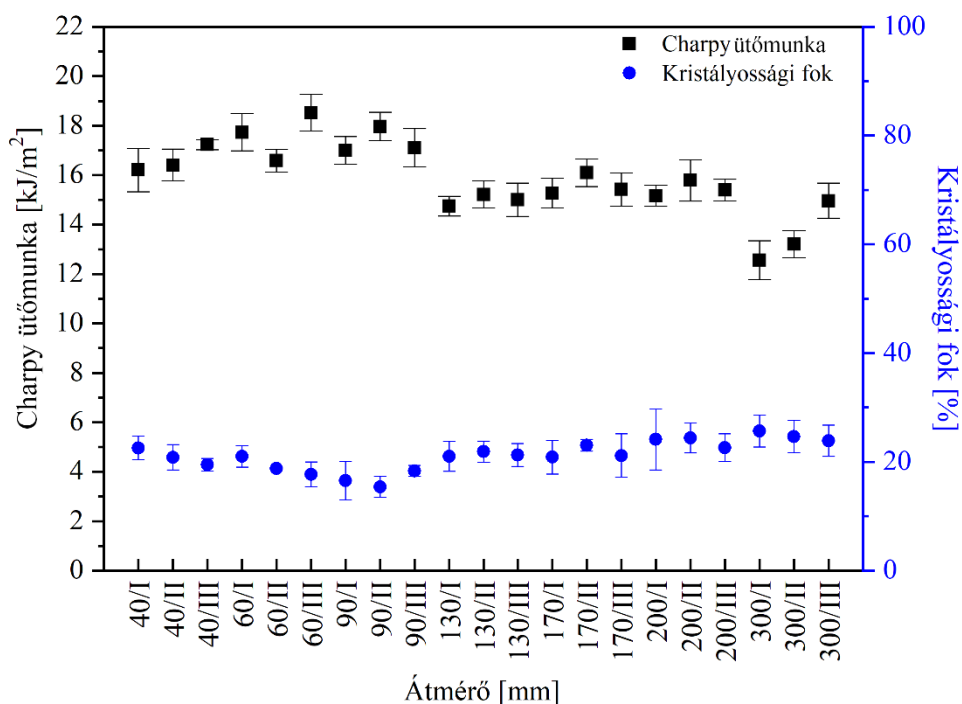
A többváltozós lineáris regressziós vizsgálatokat az IBM SPSS 27-es verziószámú matematikai statisztikai szoftverrel végeztem el.

3. EREDMÉNYEK

3.1. Az öntött PA 6 kiválasztási folyamata

A Charpy-féle ütővizsgálatok eredményei (5. ábra) alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a vizsgált rudátmérő tartományban az ütőmunka értékek nem állandóak. Három kategóriába csoportosítottam őket. Az első kategóriába az átmérő 40 és 90 mm közötti rudakat soroltam, ezeknek az ütőmunkája 16,2 és 18,5 kJ/m² között mozgott, ami az átlagnál nagyobb. A második kategóriába a 130, 170 és a 200 mm átmérőjű rudak tartoznak, amelyeknek ütőmunkája 14,7 és 16 kJ/m² között alakult. A harmadik kategóriába a 300 mm átmérőjű rúd került, mivel ennek ütőmunkája átlag alatti, 12,5 és 15 kJ/m² között mozgott. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a magnézium katalizálású öntési technológiával gyártott félkész rudak gyártási mérete befolyásolhatja az alkatrészek szívósságát, és az ütőigénybevételrel szembeni viselkedését, ami a mérnöki alkalmazhatóság szempontjából lényeges tényező.

Az általam vizsgált magnézium katalizálású öntési technológiával készült félkész rudak kristályossági foka 15 és 27% közötti tartományban mozgott, amit a 5. ábra szemléltet. A DSC vizsgálat eredményei alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a kristályossági fok változása befolyásolja a Charpy-féle ütőmunkát. Ennek megfelelően a magasabb kristályossági fok képes a szívósság csökkenését előidézni. Megállapítottam, hogy a poliamid tulajdonságait befolyásoló tényezők közül a kristályossági fok a Charpy-féle ütőmunka változásának 62,3%-ban okozza, amit lineáris regresszióval is alátámasztottam.



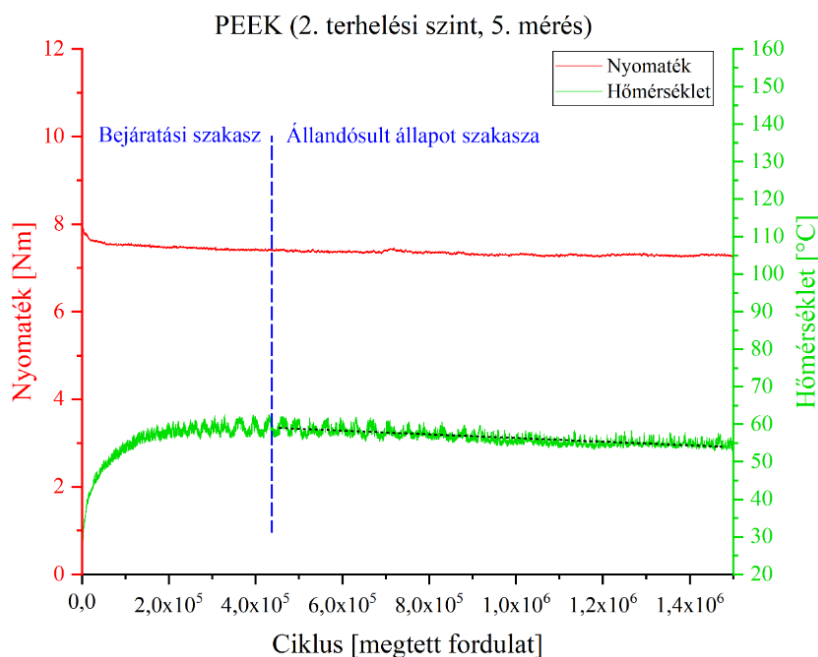
5. ábra A Charpy-féle ütőmunka és a kristályossági fok értékei a magnézium katalizálású öntött PA6 rudaknál

A kutatási munkám, a mérési eredmények reprodukálhatósága attól függ, hogyan tudom definiálni a vizsgált anyagoknak a szívósságát és a kristályossági fokát.

A kutatásaim alapján megállapítom, hogy az $\varnothing 70$ mm magnézium katalizálású öntött poliamid 6 rúdból forgácsolási eljárással gyártott fogaskerekeknek a szívóssága, amelyeket a mérésekhez használok, másnéven Charpy ütőmunkája 16,2 és 18,5 kJ/m² között van. Ezzel definiálom, hogy a kutatási eredmények és a következtetések a poliamid esetén erre a konkrét anyagra vonatkoznak, és nem pedig a hagyományos értelemben vett poliamid 6-ra.

3.2. A fogaskerék-vizsgálatok eredményei

A 6. ábrát példaként ragadtam ki a mérési adatsorok közül, ami a fogaskerék-vizsgálatok online görbéit szemlélteti. Az ábrán szerepel a vizsgált műanyag neve, a terhelési szint, valamint az ismétlés száma. A diagramon a nyomaték és a hőmérséklet a ciklus függvényében került ábrázolásra. A diagramon jól látható, hogy közel állandó nyomaték mellett a bejáratási szakaszban a hőmérséklet folyamatosan nő, amíg eléri az egyensúlyi hőmérsékletet, majd az állandósult állapot szakaszában finoman csökkenni kezd és ez a csökkenési jelleg a vizsgálat végéig permanensen megmarad.



6. ábra Nyomaték és hőmérséklet a ciklus függvényében PEEK esetén

A Newton-féle lehülési törvényből kiindulva meghatároztam, hogy negatív kitevőjű exponenciális jellegű telítődési függvénnyel jól közelíthető a fogtő hőmérsékletemelkedése a ciklus függvényében. Megállapítottam tehát, hogy a fogtő hőmérséklete a bejáratási szakaszban az alábbi függvénnyel jól közelíthető, a ciklus függvényében:

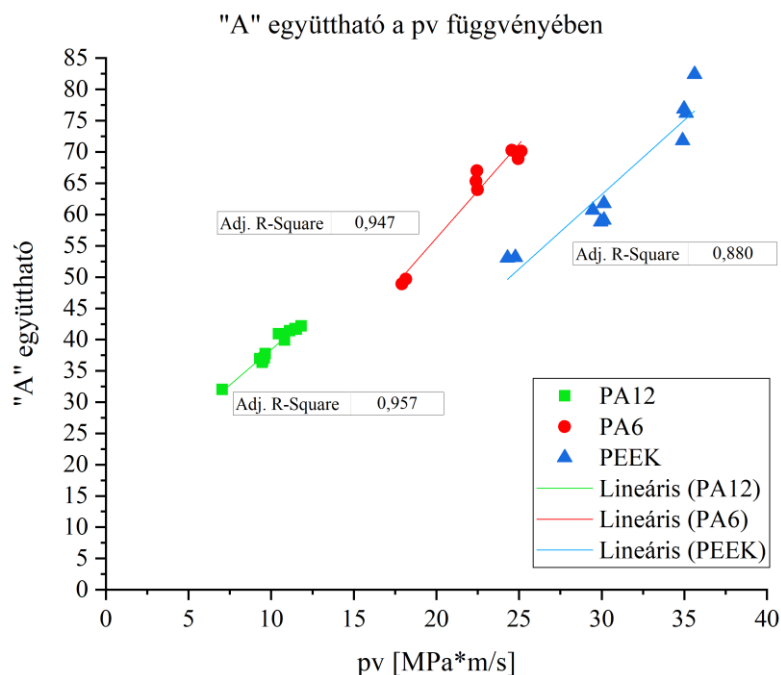
$$T(N_L) = A - B \cdot e^{-C \cdot N_L}, \quad (1)$$

ahol „A”, „B” és „C” a függvény együtthatóinak értéke, és ezek előjele minden esetben pozitív.

Fontos megemlíteni, hogy az együtthatók fizikai tartalommal bírnak. Az „A” együttható a fogtő egyensúlyi hőmérsékletét jelenti, amelyre a fogaskerék működés közben beáll a bejáratási szakasz végére. A „B” paraméter a kezdeti és az egyensúlyi hőmérséklet különbsége. A „C” együttható pedig az egyensúlyi hőmérséklet elérésének mértéke ciklussal (N_L) kifejezve, azaz milyen ciklusszám után éri el aszimptotikusan az egyensúlyi hőmérsékletet.

A regressziós analíziseket kétféle módon hajtottam végre. Első körben anyagonként futtattam le az elemzéseket, ahol csak a (i) ciklust, (ii) pv értéket definiáltam független változóként. Második körben az összes anyagot figyelembe vettem, és a következő paramétereket tekintettem független változónak: (i) ciklus, (ii) pv érték, (iii) anyagtulajdonságok (sűrűség, folyáshatár, szakadási nyúlás, rugalmassági modulus, Poisson-tényező, üvegesedési hőmérséklet, olvadáspont, hővezetési tényező, hőalaktartósság, hajlító szilárdság, Charpy ütőmunka, Shore-D keménység, golyóbenyomódásos keménység, H/E viszonyszám). Az utóbbi elemzésnek az a célja, hogy megvizsgáljam, mely anyagtulajdonságok játszanak szerepet a fogtő egyensúlyi hőmérsékletének kialakulása szempontjából.

Az „A” együttható értékeit anyagonként a pv érték függvényében a 7. ábrán jelenítettem meg.



7. ábra „A” együttható értékei a pv érték függvényében

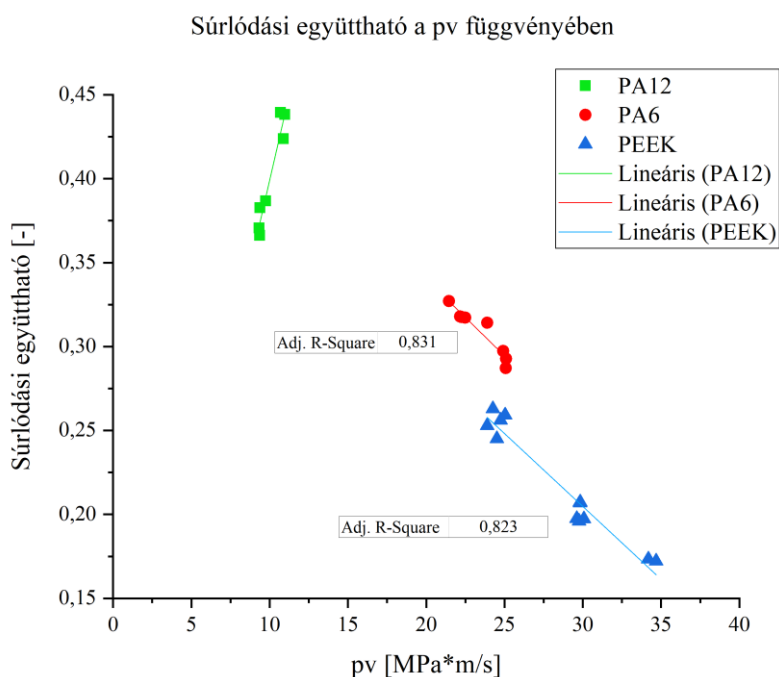
Az anyagonként elvégzett lineáris regressziós elemzések alapján az exponenciális típusú telítődési függvény együtthatóiról általánosan elmondható, hogy a pv érték volt a legmeghatározóbb független változó, amelynek növekedése növeli az „A”, a „B” és a „C” együttható értékét is.

Az „A” együttható és a pv érték összefüggése megegyezik az anyagonkénti összehasonlításnál tapasztaltakkal, azaz a pv érték növekedésével együtt nő. Ezzel szemben a „B” együttható esetében a Poisson-tényezővel negatív kapcsolat áll fenn, azaz a Poisson-tényező növekedése a „B” együttható csökkenését okozza. A „C” együttható esetében a független változók közül a regressziós modell béta, β együtthatója alapján megállapítható, hogy az üvegesedési hőmérséklet hatása jelentősebb, mint a pv értéké. Továbbá az összefüggésből az is kiderült, hogy az üvegesedési hőmérséklet növekedése a pv szorzattal ellentétben negatívan hat a „C” együttható értékére.

A fogaskerékvizsgálatok során meghatároztam anyagpárra vonatkozóan az átlagos súrlódási együtthatókat (8.ábra). A regressziós vizsgálatokat elvégeztem anyagonként szétválasztva, valamint egybevetve. Az előbbinél arra kerestem a választ, hogy anyagpárra vonatkoztatva a súrlódási együtthatóra a fogtest hőmérséklete vagy a pv érték van-e hatással. Az utóbbit azért, hogy megnézzem, hogyan hatnak az anyagtulajdonságok a súrlódási együtthatóra. A mérési és regressziós vizsgálatok eredményeit elemezve megállapítható, hogy:

- A PA12 alapanyagból SLS 3D nyomtatási technológiával készült fogaskerekeknél 9,3 és 10,9 MPa·m/s pv érték mellett a bejáratás szakaszt követően az állandósult állapotban a kialakuló súrlódási együttható 0,37 - 0,44 között van.
- A PA12 fogaskerékpároknál a fogtest hőmérséklete volt a meghatározó tényező a súrlódási együttható szempontjából, és a béta együttható alapján elmondható, hogy a hőmérséklet növekedésével a súrlódási együttható is nő.
- A magnézium katalizálású öntött PA6 rúdból forgácsolási eljárással készült fogaskerekek esetén a súrlódási együttható 0,29 - 0,33 tartományban mozog az alkalmazott terheléstől függően, 21,4 – 25,1 MPa·m/s pv érték sávban.

- Az extrudált PEEK rúdból forgácsolási eljárással előállított fogaskerekeknél a súrlódási együttható 0,17 – 0,26 közé esik a számítási adatok alapján 23,9 és 34,7 MPa·m/s közötti pv értéknél.
- A PA6 és PEEK anyagpárosításoknál a pv érték hat dominánsan a súrlódási együtthatóra, és közöttük negatív lineáris összefüggés áll fenn, azaz a pv érték növekedése a súrlódási együttható csökkenését okozza.
- Amennyiben az összes anyagra vonatkozólag figyelembe vesszük a pv érték és a fogtest hőmérséklet mellett az anyagtulajdonságokat is, akkor megállapítható, hogy a súrlódási együttható szempontjából meghatározó szerepet játszik a nyomaték, a Shore D keménység és a fogtest hőmérséklete. Általánosan elmondható a 3 anyag esetében a béta együttható alapján, hogy a nyomaték a legmeghatározóbb a súrlódási együtthatóra, a Shore D keménység a második, és legkevésbé a fogtest hőmérséklete befolyásolja. Továbbá az is megállapítható, hogy a nyomaték és a Shore D keménység növelése, szemben a fogtest hőmérséklettel, csökkenti a súrlódási együtthatót.



8. ábra A súrlódási együttható a pv függvényében anyagpáronként elkülönítve

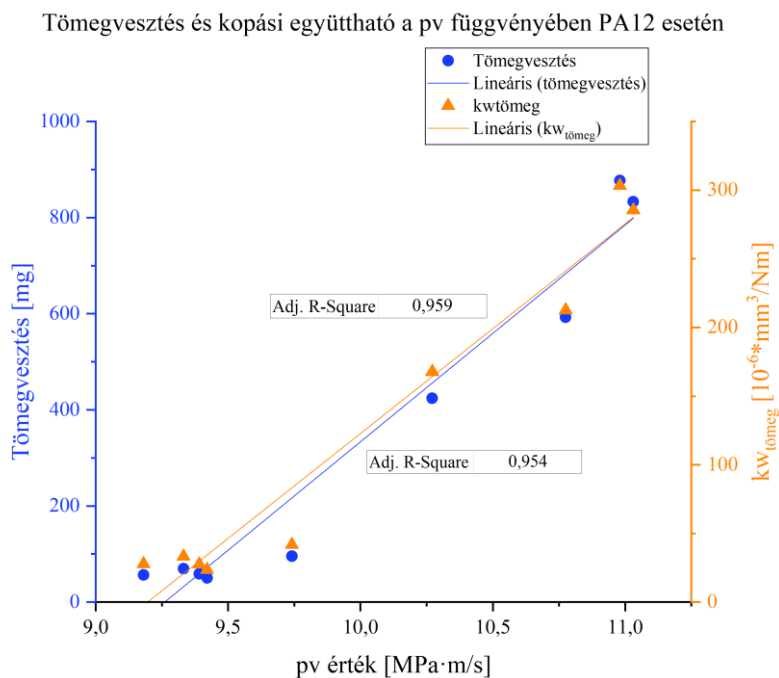
3.3. A fogaskerékkopás-vizsgálatok eredményei

A kopási együtthatót a műanyag fogaskerekek kopásának előrejelzésére használják, ami igen fontos az élettartam szempontjából, ezért folytattam vizsgálatokat ezen a téren még kevésbé vagy egyáltalán nem kutatott anyagoknál.

A fogaskerekek tömegmérését nagy pontosságú analitikai mérleggel hajtottam végre a fogaskerekek járatása előtt és után, és ennek különbsége adja a tömegvesztést milligrammban kifejezve. A mérési eredmények áttekintéséből kiderül, hogy a tömegvesztés és a kopási együttható értékeiben nagyságrendi eltérés tapasztalható a különböző anyagpárosítások esetén.

A PA12 anyagpárosításnál a kopási együttható, $k_{wtömeg} = 23,6 - 303,4 \cdot 10^{-6} \cdot \text{mm}^3/\text{Nm}$ között van a vizsgált pv tartományban (9. ábra). A regressziós vizsgálatok eredményei azt mutatják, hogy a PA12 fogaskerékpárosításnál a tömegvesztés és a tömegvesztés alapú kopási együttható esetében is a pv érték a meghatározó tényező. A pv érték növekedésével a tömegvesztés és a $k_{wtömeg}$ kopási együttható értékének növekedése várható.

A PEEK fogaskerékpároknál a tömegvesztésből számított kopási együttható és a pv érték között negatív lineáris kapcsolat van, tehát a pv érték növekedésével a kopási együttható szignifikánsan csökken. A regressziós vizsgálatok ezzel szemben azt mutatják, hogy a $k_{wtömeg}$ kopási együttható szempontjából nem a pv érték a meghatározó, hanem a súrlódási együttható, amelynek növekedése egyben növeli a kopási együtthatót is. A PEEK esetében a pv érték és a súrlódási együttható között negatív lineáris kapcsolat van, azaz a pv érték növekedése csökkenti a súrlódási együtthatót, így már egyértelmű a pv érték és a kopási együttható közötti összefüggés is. A PEEK fogaskerékpár esetén a tömegvesztéses kopási együttható $0,99 - 2,2 \cdot 10^{-6} \cdot \text{mm}^3/\text{Nm}$ között alakult.



9. ábra Tömegvesztés és kopási együttható a pv érték függvényében PA12 fogaskerékpár esetén

Amennyiben az összes anyagot figyelembe vesszük a regressziós vizsgálatoknál, akkor általánosan elmondható, hogy a tömegvesztés és a $k_{wtömeg}$ kopási együttható szempontjából a független változók közül a súrlódási együttható a meghatározó tényező.

A mikroszkópos kopásértékelés eredményeit, azaz az átlagos lineáris kopást, W_m , és az abból számított kopási együtthatót, k_{wW_m} , a pv érték függvényében a 10. és a 11. ábrán illusztráltam. A regressziós vizsgálatok folyamán az anyagoként szétválasztott modellnél az átlagos lineáris kopást és ezen távolságon alapuló kopási együtthatót vettem függő változónak. A pv értéket, a súrlódási együtthatót és a fogtest hőmérsékletet pedig független változónak tekintettem. Az anyagokat összefoglaló modellnél a független változók kiegészülnek az anyagtulajdonságokkal is.

A PA12 fogaskerekek mikroszkópos elven történő kopás kiértékesének eredményei a 10. ábrán láthatóak. A PA12 fogaskerékpárok esetén megállapítható, hogy $9,2 - 11,03 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$ pv érték között a kopási együttható $56 - 512 \times 10^{-6} \cdot \text{mm}^3/\text{Nm}$ tartományban található.

A regressziós modellek alapján megállapítható, hogy az átlagos lineáris kopás és a pv érték, valamint a k_{wW_m} kopási együttható és pv érték között is lineáris kapcsolat van, és a pv érték növekedése hozzájárul a lineáris kopás és a kopási együttható növekedéséhez is.

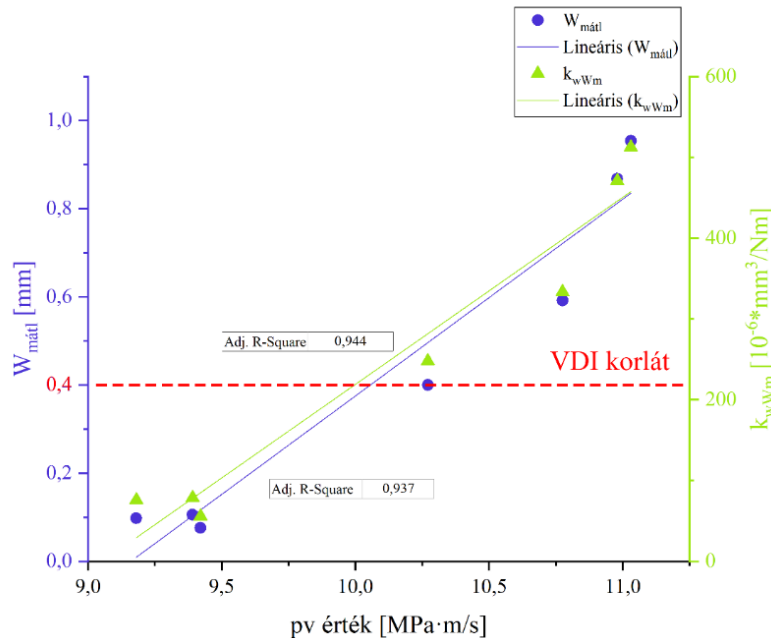
A PA6 fogaskerékpárokra megállapítható, hogy $17,8 - 24,6 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$ terhelés tartományban a kopási együttható $6,6 - 9,8 \times 10^{-6} \cdot \text{mm}^3/\text{Nm}$ között alakul.

A PEEK fogaskerekek mikroszkópos kopásértékelése az eddig vizsgált anyagokhoz képest eltérő jelenséget mutat, amit a 11. ábra szemléltet. A PEEK kerekeknél az aktív fogoldalon létrejövő anyagvesztés, azaz a kopás a terhelés növekedésével együtt nő, hasonlóan az előző két anyaghoz, azonban a kopási együttható csökkenő trenddel válaszol a terhelés növekedésére. A

PEEK fogaskerékpárookra megállapítható, hogy a 23,7 – 35,2 MPa·m/s pv tartományban a kopási együttható $7 - 9,5 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ közé tehető.

Az átlagos lineáris kopás és a kopási együttható esetében elmondható, hogy a PA6 és PEEK fogaskerékpároknál egy nagyságrenddel kisebbek, mint, amit a PA12 fogaskerekeknél.

Átlagos lineáris kopás és kopási együttható a pv függvényében PA12 esetén



10. ábra Átlagos lineáris kopás és kopási együttható a pv érték függvényében PA12 fogaskerékpár esetén

A PEEK kerekeknél a regressziós vizsgálatok eredményei alapján kijelenthető, hogy:

- Az átlagos lineáris kopás és a pv érték közötti lineáris függvénnyel leírható, tehát a pv érték növekedésével együtt az átlagos lineáris kopás is növekszik.
- A kopási együttható és a pv érték kapcsolata szintén leírható elsőfokú polinommal, ellenben negatív lineáris kapcsolat áll fenn, tehát a pv érték növekedése elősegíti a kopási együttható csökkenését.

A regressziós vizsgálatok alapján, ahol az anyagtulajdonságokat is figyelembe vettem, általánosan elmondható, hogy az átlagos lineáris kopás és a k_{wWm} kopási együttható szempontjából a független változók közül a golyóbenyomódásos keménység a meghatározó tényező.

A röntgen tomográfias kopásértékelés jellemző eredményeit PEEK esetén, azaz a névleges kopást a 12. ábrán szemléltetem.

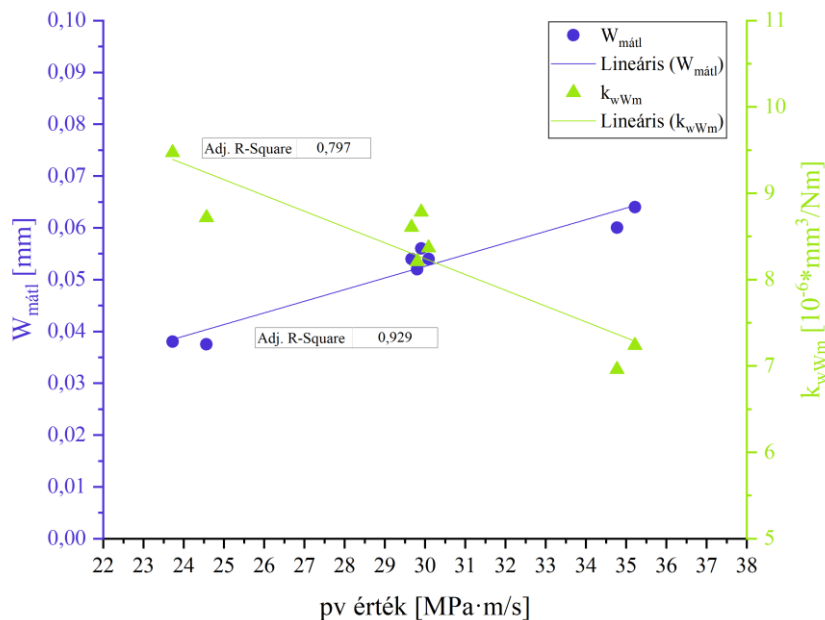
A PA12 fogaskerékpárok esetén megállapítható, hogy 9,3 – 11,03 MPa·m/s pv tartományban 0,058 – 0,98 mm névleges kopással számolhatunk. Az XCT névleges kopás és pv érték között a regressziós vizsgálatok alapján erős pozitív lineáris korreláció áll fenn a PA12 fogaskerekek esetén.

A PA6 kerekeknél megállapítható, hogy 17,8 és 25 MPa·m/s közötti pv tartományban a névleges kopás értéke 0,006 és 0,017 mm közé tehető.

A PEEK fogaskerékpároknál megállapítható, hogy a 25 – 34,8 MPa·m/s pv tartományban a névleges kopás 0,011 és 0,023 mm között változik. A PEEK kerekeknél a többváltozós lineáris regresszió eredményei alapján kijelenthető, hogy az XCT névleges eltérés és a pv érték között negatív lineáris kapcsolat van, azaz a pv érték növekedése csökkenti a névleges eltérést.

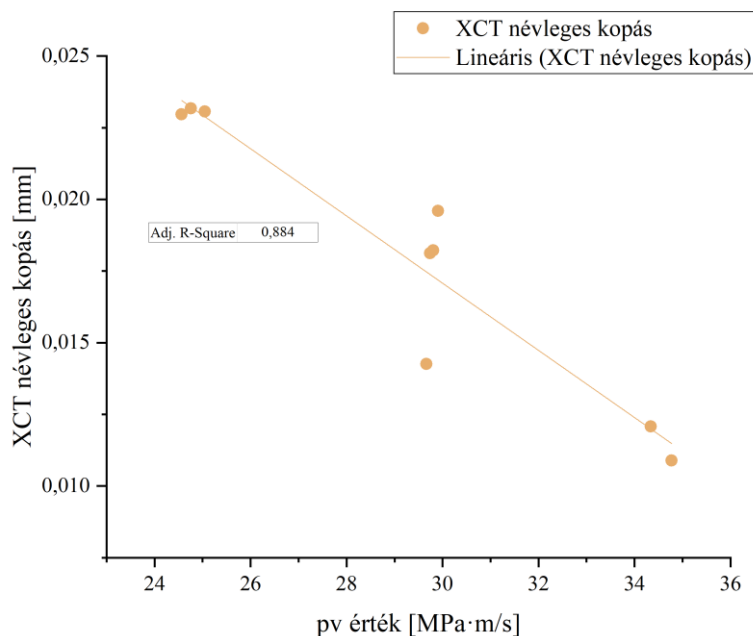
Az anyagtulajdonságokra kiterjesztett regressziós vizsgálatok eredményei alapján, általánosan megfogalmazható, hogy az XCT névleges eltérés szempontjából a független változók közül a súrlódási együttható a meghatározó tényező.

Átlagos lineáris kopás és kopási együttható a pv függvényében PEEK esetén



11. ábra Átlagos lineáris kopás és kopási együttható a pv érték függvényében PEEK fogaskerékpár esetén

XCT névleges kopás a pv függvényében PEEK esetén



12. ábra XCT névleges eltérés a pv érték függvényében PEEK fogaskerékpárok esetén

4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Tézis

Megállapítottam, hogy az öntött poliamid 6 rúd féltermékeknel 40-300 mm átmérő tartományban az ütőmunka értékek nem állandóak, és a magnézium katalizálású öntött rudak gyártási mérete befolyásolja az anyag szívósságát. Charpy ütővizsgálatokkal megállapítottam, hogy az átmérő növekedésével csökken az ütőmunka. DSC vizsgálatokkal igazoltam, hogy a magnézium katalizálású öntött PA6 rudak 40-300 mm átmérő tartományában a kristályossági fok 15 és 27% között van. Többváltozós lineáris regressziós vizsgálattal kimutattam, hogy a poliamid tulajdonságaira ható tényezők közül a kristályossági fok önmagában a Charpy-féle ütőmunka változását 62,3%-ban befolyásolja. Ezek alapján célszerű magnézium katalizálású öntött PA6 rudakból fogaskereket tervezni.

2. Tézis

A fogaskerék-vizsgálatoknál alkalmazott öntött PA6, PA12 (SLS) és PEEK anyagok esetében azonos anyagpárosítás mellett a fogaskerék hőmérséklete kapcsán többváltozós lineáris regressziós vizsgálatok alapján megállapítom, hogy a fogtő hőmérséklete a

$$T(N_L, pv) = A(pv) - B(pv) \cdot e^{-C(pv) \cdot N_L}$$

függvénnyel írható le, ahol az A, B és C együtthatók lineárisan függenek a pv értéktől.

A függvényben szereplő tagok: T : a fogtő hőmérséklete [$^{\circ}\text{C}$]; N_L : a ciklusok száma [megtett fordulat]; A : együttható a fogtő egyensúlyi hőmérséklete; B : együttható a kezdeti és az egyensúlyi hőmérséklet különbsége; C : együttható pedig az egyensúlyi hőmérséklet elérésének mértéke.

3. Tézis

Azonos anyagpárosítással együtt járatott polimer fogaskerekek esetében megállapítottam, hogy a pv érték növelésére a PA12, PA6 és PEEK anyagpárok eltérő súrlódási választ adtak a vizsgálati rendszerben: az SLS technológiával készült PA12 fogaskerekeknel a súrlódás a terheléssel együtt nő, ellenben a hagyományos forgácsolási technológiával készült PA6 és PEEK fogaskerekeknel a terhelés növekedésével csökken a súrlódási együttható.

4. Tézis

Méréseimmel és többváltozós regresszióval feltártam, hogy a súrlódási együttható szempontjából meghatározó szerepet játszik a nyomaték, a Shore D keménység és a fogtest hőmérséklete. A kutatási rendszerben a vizsgált anyagok esetében a súrlódás értékére legnagyobb hatást az átvitt nyomaték-, majd a Shore D keménység és legkevésbé a fogtest hőmérséklete gyakorolja. Megállapítottam, hogy a nyomaték és a Shore D keménység növelése, szemben a fogtest hőmérséklettel, csökkenti a súrlódási együtthatót.

5. Tézis

A kopásértékelési eljárásokkal megállapítottam, hogy a pv függvényében a kopás két irányú viselkedést mutat a PA12 és a PEEK anyagpárok esetében: az SLS technológiával gyártott PA12 fogaskerekeknel a pv érték 17%-os növekedése 914%-os kopás növekedést okozott, míg a hagyományos forgácsolási technológiával gyártott PEEK fogaskerekeknel a pv érték 46%-os növekedése a kopás 24%-os csökkenését eredményezte. A többváltozós lineáris regresszióval igazoltam, hogy a kopást a súrlódás és a keménység befolyásolja egymással ellentétes módon, míg a súrlódás növekedése növeli a kopás mértékét, addig a keménység növekedése csökkenti azt.

6. Tézis

Olyan új, röntgen tomográfia (XCT) eljáráson alapuló kopásértékelési módszert dolgoztam ki polimer fogaskerekekre, amely a hagyományos kopásmérési eljárásokkal szemben (tömegvesztés, profilváltozás), három dimenzióban képes az elméleti és valós fogprofil közötti különbségek számszerű értékelésére, továbbá alkalmas pl. a gyártási eljárásokra visszavezethető alak- és geometriai pontatlanságok figyelembe vételére a tényleges kopás meghatározásánál. A módszer lehetőséget ad a fogoldal kopásának feltérképezésére, ami hozzájárul a kopási mechanizmusok mélyebb megértéséhez.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A kutatómunkám több területen is jól hasznosítható új tudományos eredményeket hordoz. A műszaki gyakorlat számára támogatást nyújt az öntött poliamid 6 féltermékek kiválasztási folyamatában. A tervezőknek pedig anyagjellemzőket és összefüggéseket szolgáltat a polimer fogaskerekék hatékonyabb tervezéséhez.

A magnézium katalizálású öntött poliamid 6 rúd féltermékek esetében megállapítottam, hogy a gyártási méret hatással van a szívósságra. Az ütővizsgálatok eredményei alapján javaslatot tettem az ajánlott rúd átmérőtartományára a fogaskerekék alapanyag kiválasztása kapcsán. Regressziós vizsgálatokkal rámutattam arra, hogy a poliamid 6 kristályossági foka befolyásolja a Charpy-féle ütőmunka értékét.

A hagyományos fogazási eljárás mellett a még nővumnak számító 3D nyomtatási technológiával (SLS) készült fogaskerekereket is tanulmányoztam annak érdekében, hogy feltárjam a bennük rejlő lehetőségeket.

Megállapítottam adott fogaskerékpár kombinációk esetében, hogy a fogaskerék egyensúlyi fogtsthőmérséklete a megtett fordulat függvényében hogyan alakul, és függvényillesztést alkalmazva meghatároztam egy általános összefüggést, amellyel a változás leírható a bejáratási szakaszban. Az összefüggésben szereplő együtthatók elemzését követően megadtam, hogy az együtthatók és a pv érték közötti kapcsolat a legtöbb esetben jó közelítéssel ($R^2 > 0,9$) elsőfokú polinommal leírható.

A polimer fogaskerekerek tervezési irányelvének egyik nagy hátrányát, a tervezéshez nélkülözhetetlen anyagjellemzők közül a súrlódási együtthatót, néhány eddig még nem elérhető anyagkombinációra meghatároztam, az állandósult állapot szakaszában. Mindezt úgy, hogy adott terhelési tartományban definiáltam a súrlódási együttható változását. Továbbá rámutattam az adott anyagoknál a terhelés és a súrlódás kapcsolatára, és lineáris összefüggést adtam a súrlódási együttható meghatározásához a pv érték függvényében jó közelítéssel ($R^2 > 0,9$).

A polimer fogaskerekerek tervezésének kardinális kérdése az élettartambecslés, aminek meghatározása a kopási együttható segítségével történik. Ezért 3 különböző kopásértékelési módszert alkalmaztam arra, hogy minél pontosabban meg tudjam határozni a fogaskerekerek kopását. Az általam vizsgálat anyagpárokra (PA12/PA12; PA6/PA6 és PEEK/PEEK) megállapítottam a kopási együtthatót adott üzemi feltételek mellett. Lineáris regressziót alkalmazva összefüggést adtam a vonatkozó anyagpárokra annak érdekében, hogy a kopási együttható meghatározható legyen a pv érték függvényében a vizsgált terhelési tartományban jó közelítéssel ($R^2 > 0,8$).

Új kopásértékelési módszert dolgoztam ki a műanyag fogaskerekerekre, amely röntgent tomográfián (XCT) alapszik. Ezzel az eljárással a fogak kopása már nemcsak síkban, hanem térben is értékelhetővé válik, és a fogoldal mentén is tudjuk követni a profil változását, így mélyebb rálátást kapunk a kopási mechanizmusokra.

Az elvégzett kutató munkám alapján javaslatot tennék az általam megállapított összefüggések kiterjesztésére annak érdekében, hogy szélesebb terhelési tartományban is alkalmazhatók legyenek.

Ezen kívül szorgalmaznám további anyagkombinációk vizsgálatát, akár eltérő anyagpárosításra vonatkozólag is, de mindenképpen polimer-polimer párosításnál maradva.

Hasznosnak látom még a terhelésen kívüli paraméterek vizsgálatát, mint például a forgási sebesség, a kenés, a modul és a szabályozott környezeti hőmérséklet. Ezek mind hiányoznak a szakirodalomból, illetve a tervezési segédletekből és irányelvekből.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A fogaskerekek elengedhetetlen elemét képezik az erőátviteli rendszereinknek, ami nélkül elképzelhetetlen lenne a hétköznapi életünk. A fém kerekek mellett teret nyertek a műanyag fogaskerekek is, és számos ipari területen alkalmazzák őket, még olyan kiemelt részeken is, mint az orvostudomány vagy az autóipar. Ez annak köszönhető, hogy a fém kerekekkel szemben több előnyös tulajdonsággal is rendelkeznek, ami egyes alkalmazási területen egyedülállóvá teszi őket. Ilyen jellemzők például a súly-szilárdság arány, az önkenő tulajdonság, a korrózióval szembeni ellenállóképesség, a jó csillapítóképesség, az alacsony zajszint és a gazdaságos gyárthatóság. A műanyag fogaskerekek felhasználhatóságának azonban korlátot szab a limitált teherbíróképesség, a kis merevség, a hőmérsékletváltozásra való érzékenység, ami a mechanikai tulajdonságok romlásához vezet.

A műanyag fogaskerekek tervezéséhez jelenleg csak a német VDI 2736 irányelv nyújt segítséget, amelynek hátránya, hogy csak néhány anyagkombinációra dolgozták ki a méretezéshez szükséges anyagjellemzőket. Így annak ellenére, hogy manapság már nagyteljesítményű műszaki műanyagok is elérhetők, valamint az additív gyártástechnológia is a hétköznapiak részévé vált, a tervezők nem tudják felhasználni ezeket az alapanyagokat a fogaskerék alkalmazásokhoz, mivel nem végezhető el a fogaskerekek megfelelő pontosságú tervezése.

Kutatómunkám a fogaskerekek területén többrejtű. Egyrészt hozzájárulok a fogaskerekek alapanyagának kiválasztásához poliamid 6 féltermékek esetében. Másrészt elősegítem a tervezést olyan innovatív és nagyteljesítményű polimerek esetében, amelyek méretezéséhez eddig nem voltak elérhetőek a megfelelő anyagjellemzők, azonban alkalmasnak bizonyulnak fogaskerék alapanyagként.

Az anyagvizsgálataim eredményei igazolták azt a feltevést, hogy a magnézium katalizálású öntési technológiával készülő poliamid 6 rúd féltermékek szívóssága függ a gyártási mérettől, aminek háttérben főként a kristályosság fok áll.

A fogaskerék-vizsgálataim alapján egyfelől anyagpárokra vonatkozóan megállapítottam a fogaskerék egyensúlyi fogttesthőmérsékletét leíró összefüggést a megtett fordulat függvényében, amely egy két változós függvény (pv, ciklus), és adott pv tartományban érvényes.

Másfelől a tervezésnél elengedhetetlen fogttest melegedés számításához anyagpárokra vonatkozóan súrlódási együtthatókat adtam, amelyek adott pv tartományban használhatók. Továbbá anyagpáronként rámutattam a súrlódás és a terhelés kapcsolatára.

A fogaskerékkopás-vizsgálataim eredményei lehetőséget nyújtanak az élettartambecslések elvégzésére, aminek alapját a kopási együttható képezi. A kopás meghatározására 3 különböző mérési eljárást alkalmaztam, tömegmérést, mikroszkópos kiértékelést és röntgen tomográfiát (XCT). A vizsgált anyagpárokra megállapítottam a kopási együtthatót, ami meghatározott pv tartományban alkalmazható.

A műanyag fogaskerékkopás értékelésre új módszert dolgoztam ki, amely röntgen tomográfián (XCT) alapszik. Az eljárás lehetővé teszi a fogak kopásának térben történő értékelését, azaz a kopást már a fogoldal mentén bármely pontban meg tudjuk határozni, aminek köszönhetően többlet információhoz jutunk a kopási mechanizmusokról. A kopás mellett a módszer további lehetőségeket rejt magában, ilyen például a gyártási pontosság ellenőrzésére, zárványok feltérképezése vagy az anyag porozitásának felmérése, amelyek hatással vannak a fogaskerék meghibásodás folyamatára.

7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK

Lektorált cikk világnyelven

1. Keresztes R. Zs., **Odrobina M.**, Kalácska G., Fledrich G. (2017): Development of polymer gear test rig for loadbearing examination. *Mechanical Engineering Letters: R and D: Research And Development*, Vol. 15, pp. 72-80., 8 p., ISSN 2060-3789
2. Keresztes, R. Zs., **Odrobina, M.**, Nagarajan, R., Subramanian, K., Kalacska, G., Sukumaran, J. (2019): Tribological characteristics of cast polyamide 6 (PA6G) matrix and their composite (PA6G SL) under normal and overload conditions using dynamic pin-on-plate system, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 160, pp. 119-130., 12 p., ISSN 1359-8368 (IF: 11,322)
3. **Odrobina M.**, Kalácska G., Keresztes R. Zs. (2018): The Effect of Sizes of the Cast Polyamide 6 Rods upon Tensile-Impact Strength, *International Journal Of Engineering and Management Sciences / Műszaki és Menedzsment Tudományi Közlemények*, Vol. 3 (1), pp. 21-24., 4 p. ISSN 2498-700X
4. **Odrobina M.**, Sarankó Á., Kalácska G., Keresztes R. (2018): Tribological behaviour of electrically conductive and self-lubricating cast polyamide 6 composites, *Mechanical Engineering Letters: Research and Development*, Vol. 17, pp. 67-73., 7 p., ISSN 2060-3789
5. **Odrobina M.**, Szakál Z., Kalácska G., Keresztes R. Zs., Eberst O., Pop S. (2017): The effect of sizes of the cast Polyamide 6 rods upon impact strength. *Mechanical Engineering Letters: R And D: Research And Development*, Vol. 15, pp. 56-61., 6 p., ISSN 2060-3789
6. **Odrobina, M.**, Deák, T., Székely, L., Mankovits, T., Keresztes, R. Zs., Kalácska, G. (2020): The Effect of Crystallinity on the Toughness of Cast Polyamide 6 Rods with Different Diameters, *Polymer*, Vol 12 (2) pp. 1-16., 16 p, Paper: 293, ISSN 2073-4360 (IF: 4,967)
7. **Odrobina, M.**, Kalácska, G., Keresztes, R. Zs. (2020): Overload and Lifetime Test of Machine Cut Polymer Gears, *Acta Technica Jaurinensis*, Vol. 13 (3), pp. 197-210., 14 p., ISSN 2064-5228
8. Szakál, Z., Zsidai, L., Al-Maliki, H., **Odrobina, M.**, Kári-Horváth, A. (2016): Shear Strength Behaviour of adhesive bonded Polymer and Steel Surfaces. *Scientific Bulletin Series C: Fascicle Mechanics, Tribology, Machine Manufacturing Technology*, Vol 30, pp. 110-115., 6 p., ISSN 1224-3264