

CSIGAHAJTÓMŰ REKONSTRUKCIÓJA 3D NYOMTATÁS SEGÍTSÉGÉVEL – ESETTANULMÁNY

RECONSTRUCTION OF A WORMGEAR DRIVE USING 3D PRINTING - CASE STUDY

Sarka Ferenc*, Almási Péter**

ABSTRACT

In the article, we present the reconstruction process of the worm wheel of a two-stage worm gear drive. The process is divided into several stages, which are as follows: discovering the cause of the damage, determining existing dimensions, determining missing data, building the model in the CAD system, creating a profile curve, 3D printing, testing. Based on the results of the testing, it became necessary to create a profile shifted version of the worm wheel.

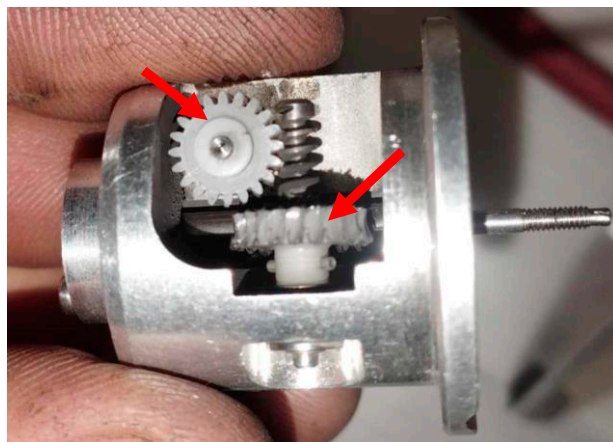
1. BEVEZETÉS

A cikkben bemutatott műszaki probléma 2024 tavaszán érkezett a Miskolci Egyetem egyik ipari partnerétől. Egy gázfogyasztásmérő meghibásodása volt a megkeresés oka. A fogyasztásmérő hőkezelő kemencék gázfogyasztását mérte. Fontos kiemelni, hogy a gázszolgáltató cég felé nem ez alapján történik az elszámolás, az óra a megbízó cég tulajdona. A hiba úgy jelentkezett, hogy a kemencék összes fogyasztása messze nem egyezett meg a gázszolgáltató által mért fogyasztással.

A cég azért fordult a Miskolci Egyetemhez, mert a piacról majd egy év várakozás után tudott volna új fogyasztásmérő órát vásárolni. A cég kérdése az volt, hogy van-e lehetőség a fogyasztásmérő megjavítására. A fogyasztásmérőt a cég szétszerelte, hogy a hiba okát felderítse. Mindent rendben találtak, kivéve a számláló forgató csigahajtóművet. Hozzánk már csak a meghibásodott részegység, egy kétlépcsős csigahajtómű jutott el (1. ábra). A hajtóműben lévő két csigakerék erősen károsodott volt.

Az egyik csigakerék károsodásának mértéke már olyan nagy volt, hogy az már nem volt képes folyamatos mozgást továbbítani (e miatt jelent meg a hiba). A vizsgálat tárgyát képező hajtómű egy kinematikai hajtás, hiszen a számláló tárcsáinak megforgatásához gyakorlatilag nincsen szükség teljesítményre. A feladatot úgy kellett megközelíteni, mintha egy műszerrel lenne dolgunk.

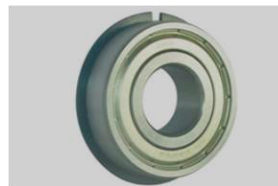
A cég arra gondolt a megkeresésekor, hogy esetleg van-e az egyetemen lehetőség a hibás kerekek újragyártására.



1. ábra. A meghibásodott hajtómű, a tönkrement csigakerekek (nyilakkal jelölve)

2. A MEGHIBÁSODÁS KÖRÜLMÉNYEI

Munkánkat elsőként a meghibásodás okának felderítésével kezdtük. Enélkül, ha még a rekonstrukció és az újragyártás sikeres is, a meghibásodás rövid üzemidő után ismét megjelenik. A hajtóművet kézbe fogva, annak tengelyeit megforgatva azonnal egyértelmű volt, hogy a tengelyek csapágyai meghibásodtak. A csapágyak nehezen forogtak, és fémesen nyikorgó hangot adtak működés közben. A csikorgó hang megjelenésének az esetek döntő többségében a kenőanyag hiánya az oka, ahogy azt látjuk [1]-ben is. A beépített csapágyak porvédőlemezes, peremes, egysoros mélyhornyú golyóscsapágyak voltak, furatuk átmérője 2 mm (F602 2Z, 2. ábra).



2. ábra. A beépített peremes csapágy

* egyetemi docens, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézete

** tanszéki mérnök, Miskolci Egyetem, Energia-, Kerámia- és Polimertechnológiai Intézet

A csigahajtások/csavarhajtások esetében a fogazott elemek közti súrlódás jelentősnek mondható, hatásfokuk alacsony, ha a többi fogazott elemű hajtáshoz viszonyítjuk. Méretezésükkor a melegedés vizsgálata is egy fontos szempont, melyet szabvány is rögzít (ANSI-AGMA 6022).

A csigakerék anyagának meghatározása kísérleti úton történt. A vizsgálat szerint az anyaga polioximetilén (POM). A POM anyag lágyuláspontja 80°C, olvadáspontja 168°C [2]. A csapágyak megnövekedett ellenállása miatt, a fogazott elemek közötti nagy súrlódás következtében a lágyuláspont közeli hőmérséklet könnyen kialakulhat. Tovább súlyosbítja a helyzetet, hogy a meghibásodott gázóra közel került elhelyezésre a hőkezelő kemencéhez.

Az emelkedett külső hőmérséklet hatására a csapágyban elhelyezett kenőanyag viszkozitása lecsökken.



3. ábra. Az egyik károsodott csigakerék mikroszkópos képe (8x nagyítás)

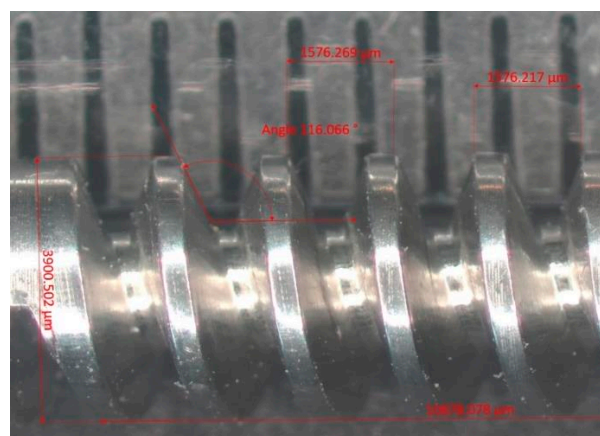
A csökkenés mértéke olyan nagy is lehet, hogy a porvédőlemez és a csapágygyűrű közötti hézagon a kenőanyag kifolyhat. A kenőanyag nélkül maradt csapágyak súrlódása tovább növekszik, illetve megindulhat a gördülőfelületek korróziója is. Az emelkedett hőmérséklet és a rossz kenési állapot együttesen olyan terhelési helyzetet idézett elő, melyet a kinematikai hajtás már nem volt képes elviselni. A hajtóműben lévő két csigakerék nagymértékben elkopott, szinte a fogak megsemmisültek. A nagyobbik csigakerék fogzata gyakorlatilag nem létezik (3. ábra).

A meghibásodás okának feltárása után elkezdődhetett a csigakerékek rekonstrukciója. A megbízó cégnek pedig rögvest javasoltuk, hogy helyezze távolabb a gázfogyasztásmérőt a kemencétől, vagy építsen köré hővédő burkolatot.

3. MIKROSKÓPOS MÉRÉSEK

A rekonstrukció első lépéseként a csiga méreteit határoztuk meg. Mivel a vizsgált csigahajtás igen kis méretű, optikai mikroszkóp segítségével vettük igénybe (típusa: Zeiss Discovery v12) a méréshez. A mikroszkóphoz rendelkezésre álló szoftver (Zeiss ZEN) segítségével néhány fontos adatot képesek voltunk megmérni a csigán (4. ábra).

A csiga egybekezdésű, ebből z_1 fogszám 1-re adódik. Mivel a csiga egybekezdésű, ezért az axiális osztás (p_{xm}) egyenlő a menetemelkedéssel (p_z), vagyis $p_{xm}=p_z$, mely a mikroszkópos mérés alapján 1,576 mm-re adódik. A fejkörátmérő $d_{a1}=4$ mm.



4. ábra. A csigán mért adatok, menetemelkedés, fejkörátmérő

A csigakerék vizsgálatára áttérve sokkal rosszabb a helyzet. A kopás mértéke olyan nagy (3. ábra), hogy a fogszámon kívül más adat mérésének gyakorlatilag nincsen értelme. Így a z_2 fogszám értéke 20. A hajtóművön sikerült hengeres csapok segítségével megmérni a hajtás tengelytávolságát is, mely 6,75 mm-re adódott.

4. SZÁMÍTÁSOK A FOGASKERÉK GEOMETRIÁRA VONATKOZÓAN

A rendelkezésre álló méretek alapján elkezdtünk a csigakerék geometriai adatain dolgozni. Néhány feltételezéssel élünk, melyek a következők:

- a csigakerék egy ferdefogazatú fogaskerék,
- a csiga arkhimédészi csiga,
- az alapprofilszög $\alpha=20^\circ$,
- a csiga fejmagassága 1 modul.

A feltételezéseket az alapján tettük, hogy a hajtás egy alárendelt helyen működő, számottevő teljesítményt nem továbbító hajtás. Feltételeztük, hogy a gyártó a legegyszerűbb (legolcsóbb) csigahajtást építette a hajtóműbe, ami gyakorlatilag egy csavarhajtásnak minősül.

4.1. A csiga adatainak meghatározása

A geometriai méreteket az [1] irodalom alapján számítottuk ki, melyeket az (1)-(5) egyenletek mutatnak.

Az axiális modul:

$$m_x = \frac{p_{xm}}{\pi} = \frac{1.576mm}{\pi} = 0.5016 mm. \quad (1)$$

Szabványos modulra kerekítve:

$$m_{x1} = 0.5 mm. \quad (2)$$

A csiga osztókör átmérője:

$$d_1 = d_{a1} - 2m_{x1} = 3 mm. \quad (3)$$

Az átmérő hányados:

$$q = \frac{d_1}{m_{x1}} = 6. \quad (4)$$

A menetemelkedési szög:

$$\gamma_1 = \tan^{-1} \frac{p_z}{d_1 \pi} = 9.4623^\circ. \quad (5)$$

4.2. A csigakerék adatainak meghatározása

A csiga adatai alapján kiszámíthatjuk a csigához illeszkedő csigakerék (ferdefogazatú fogaskerék) adatait. A csigakerék homlokmodulja (m_{t2}) egyenlő a csiga axiális moduljával (m_{x1}), vagyis $m_{t2}=m_{x1}$. A csigakerék

foghajlásszöge (β_2) pedig egyenlő kell legyen a csiga menetemelkedési szögével (γ_1). A csigakerék fogszáma $z_2=20$ ismert, vagyis a geometriai adatok meghatározhatók. A célunk a csigakerék CAD modelljének elkészítése, ezért az ehhez szükséges méreteket keressük [3] irodalom alapján (6)-(10) összefüggések segítségével.

Osztókörátmérő:

$$d_2 = z_2 \cdot m_{t2} = 10mm \quad (6)$$

Fejkörátmérő:

$$d_{a2} = z_2 \cdot m_{t2} + 2m_{t2} = 11mm \quad (7)$$

Lábkörátmérő:

$$d_{f2} = z_2 \cdot m_{t2} - 2.5m_{t2} = 8.75mm \quad (8)$$

Osztóköri fogvastagság:

$$s_2 = \frac{m_{t2} \cdot \pi}{2} = 0.7854mm \quad (9)$$

Alapkörátmérő:

$$d_{b2} = d_2 \cdot \cos \alpha = 9.397mm \quad (10)$$

A következő lépésben az ismert adatok alapján létre kell hozni a fogprofil evolvens görbét, majd az alapján a fogazatot.

5. AZ EVOLVENS GÖRBE ELŐÁLLÍTÁSA ÉS A CAD MODELL FELÉPÍTÉSE

A csigakerekek rekonstrukcióját additív technológiával (3D nyomtatás) terveztük megvalósítani. Ehhez viszont szükség van a fogaskerék CAD modelljére. A számítógépes tervező rendszerek többsége rendelkezik gépelem méretező és modellező modullal. Tapasztalatunk szerint, az így létrehozott CAD modellek kisebb nagyobb mértékben eltérnek a valós evolvens görbétől [4]. Az előző pontban meghatározott adatok és [4]-ben és [5]-ben ismertetett eljárások segítségével létrehozhatjuk az evolvens görbe pontjait, azok térbeli koordinátáinak kiszámításával. A koordináta pontokat Descartes-féle, x-y-z koordináta rendszerben, annak x-y síkjában hoztuk létre. Ennek következménye, hogy a z koordináta mindenütt zérus lesz. Az evolvens görbe, egy körön csúszásmentesen legördített egyenes egy kiválasztott pontja által leírt görbe, mely kör a fogaskerék alapköre, átmérője számítható (11) alapján.

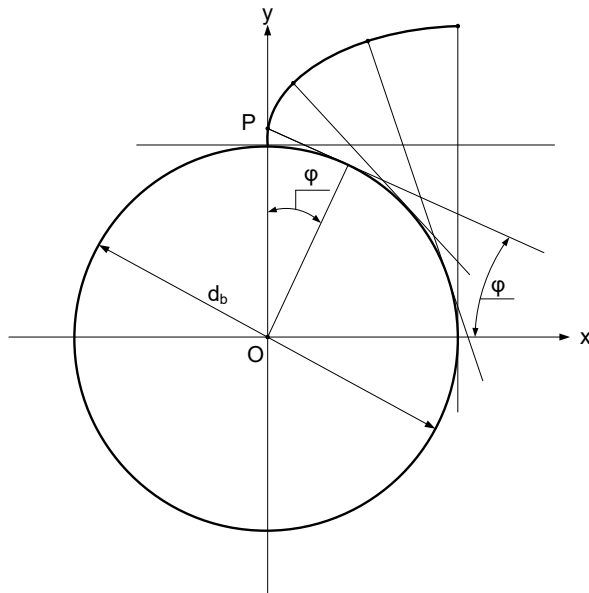
$$d_{b2} = m_{t2} \cdot z_2 \cdot \cos \alpha \quad (11)$$

Az evolvens görbe pontjainak x és y koordinátáját a következő összefüggések segítségével határoztuk meg:

$$x = \frac{d_{b2}}{2} \cdot \sin \varphi - \varphi \cdot \frac{d_{b2}}{2} \cdot \cos \varphi \quad (12)$$

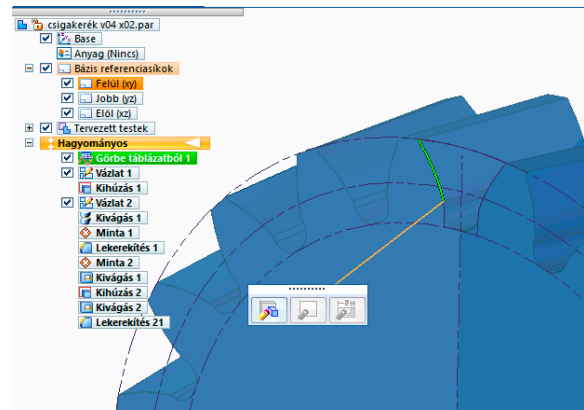
$$y = \frac{d_{b2}}{2} \cdot \cos \varphi + \varphi \cdot \frac{d_{b2}}{2} \cdot \sin \varphi \quad (13)$$

A (12) és (13) összefüggésekben szereplő φ mennyiség az a szög, mely az alapkörön legördített egyenes és a pozitív x tengely között mérhető (5. ábra).

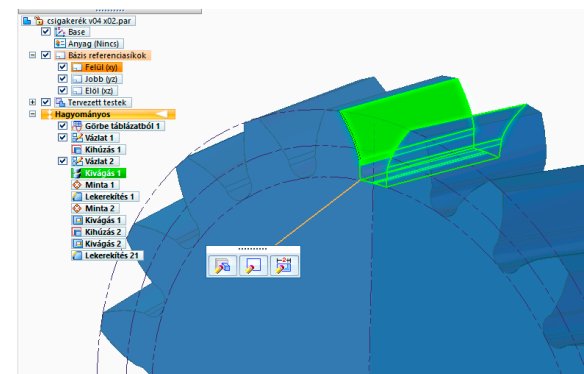


5. ábra. A φ szög értelmezése

A rendelkezésre álló adatok és összefüggések segítségével, excel programban kiszámoltuk $\varphi=0$ -tól $\varphi=90$ -ig, 0,1-es lépésközzel az evolvens görbe pontjait. A pontok koordinátái rendelkezésre álltak, a görbét CAD rendszerben létrehoztuk. A csigakerék adatainak ismeretében (4.2-es pont) egy fogárok a homloksíkban elkészíthető volt. Egy csavarvonal mentén végigvezetett kivágással pedig egy teljes fogárok létrejön. Majd az árkot a kerék kerülete mentén a fogszámnak megfelelő darabszámban kiosztva, a csigakerék elkészül (7. ábra, 7. ábra). A kerék fogazatának axiális osztása lesz a csavarvonal menetemelkedése.



6. ábra. A koordináta pontok alapján létrehozott evolvens görbe, CAD rendszerben



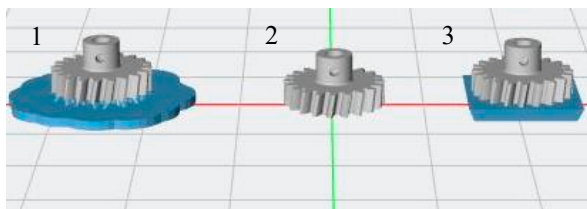
7. ábra. A fogaskeréktest létrehozása CAD rendszerben

A fogárok létrehozása után a fogtőgörbe kialakítása volt még szükséges, ezt egy körívvel valósítottuk meg. A fogtőgörbe alakjának esetünkben nincsen hatása a fogaskerék jóságára, kinematikai hajtást akarunk létrehozni. A CAD modell birtokában megkezdődhetett a fogaskerék nyomtatása.

6. 3D NYOMTATÁS

A CAD modell birtokában megkezdjük az első próba nyomtatást. A munka előtt utána jártunk, hogy milyen problémákkal találkozhatunk nyomtatott fogaskerekek esetén. Több publikáció foglalkozik meghibásodott alkatrészek additív technológiával történő reprodukciójával [6], [7]. A 3D nyomtatás során az egymásra helyezett rétegek hozzák létre az alkatrészt. Fontos megjegyezni, hogy az első néhány réteg esetén sokszor méret problémákba ütközünk. A nyomtatási paraméterek helyes megválasztásával jelentős minőségi javulás érhető el. Igen fontos a felbontás, a nyomtatás sebessége, a test orientációja [8], és további egyéb paraméterek. Mivel olyan alkatrészeket szeretnénk gyártani melyek egy másik elemmel kerülnek kapcsolatba, a csigával, ezért az érintkező felületek felületi minősége is fontos. A csiga- és csavarhajtások hatásfoka elmarad a többi fogaskerék-hajtások

hatásfokától. Kapcsolódás közben jelentős csúszás van a fogak között, jelentős melegedéssel együtt. Ezt a jelenséget a nyomtatott alkatrészek nem túl jó felületminősége is tovább ronthatja [9], [10]. Az irodalom eredményeit figyelembe véve úgy döntöttünk, hogy a fogaskerék modelljét, homloksíkjukkal lefelé helyezzük a tárgyasztalra. Továbbá a modelleket kibővítjük egy kezdő réteggel (8. ábra). A nyomtatást három különböző kezdő réteggel indítottuk:



8. ábra. Az első próba során nyomtatott kerekek

- Egy kezdő réteg után támaszokra nyomtatva,
- módosítás nélkül
- közvetlenül egy kezdő rétegre nyomtatva.

A legjobb eredményt a harmadik verzió adta. A kezdő réteget lecsiszolva, a fogaskerék profil a teljes fogszélesség mentén azonos volt. A használt nyomtató típusa: Anycubic Photo Mono, a használt anyag: PLA resin (Esun), az alkalmazott felbontás 0,05 mm.

A készre munkált csigakereket beépítettük a hajtóműbe, melynek mikroszkópos képe látható a következő ábrán (9. ábra).



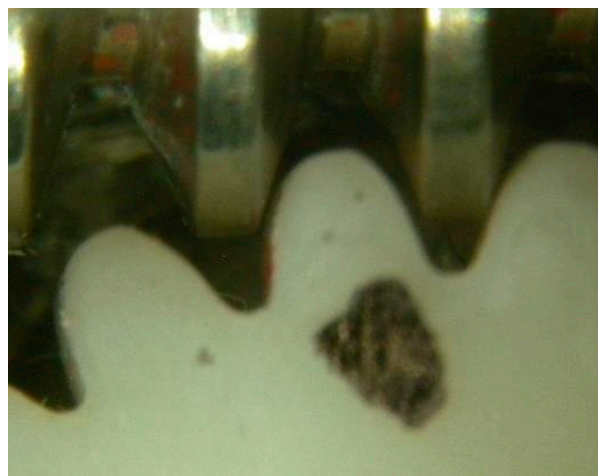
9. ábra. A beépített csigakerék

Az ábrán jól látható, hogy a csiga és a csigakerék között jelentős a foghézag és a csigakerék csak a fejmagasságon érintkezik a csigával. A kép alapján olyan érzésünk támadt, mintha nem lenne elég közel a csigakerék a csigához. Ekkor újra megvizsgáltuk a rendelkezésre álló adatokat. Kiszámítottuk a hajtás tengelytávolságát, mely (3) és (6) összefüggések alapján 6,5 mm-re adódik, a valóságban viszont 6,75 mm-t mértünk. Ez a 0,25 mm eltérés okozhatja a fenti ábrán (9.

ábra) látható problémát. Hogy a helyzetet javítsuk, profiletolással rendelkező fogaskereket kellett alkotnunk.

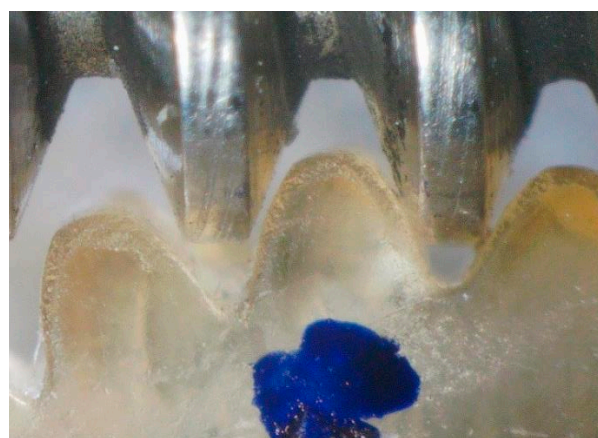
7. TESZTELÉS – MÓDOSÍTÁS, PROFILETOLÁS ALKALMAZÁSA

Az előző pontokban bemutatott folyamatot módosítottuk úgy, hogy a csigakerék profiljára profiletolást alkalmaztunk. A profiletolás tényező értékét $x=0,2$ -re választva a csigakerék profilja nagyobb átmérőre kerül, közeledik a csiga profiljához. Ezzel a módosítással elért állapot látható a következő ábrán (10. ábra). A foghézag értéke szemmel láthatóan csökkent. A csigát forgatva a csigakerék forgása folyamatos lett. Ezzel biztosítani tudtuk, hogy a gázfogyasztásmérő számlálójának forgása is folyamatos lesz.



10. ábra. A profiletolásos csigakerék

Miután a csigakerék profilját elfogadtuk, a hajtóműben található másik lépcső csigakereken is elvégeztük a rekonstrukciót. A végleges kerekeket olyan anyagból nyomtattuk, mely a POM anyaghoz képest magasabb hőmérsékleten is megőrzi szilárdságát (11. ábra).



11. ábra. A végleges kerék kapcsolódása a csigával

A kép alapján úgy tűnhet, hogy a foghézag megszűnt a csiga és a csigakerék között. A csigát kézzel megforgatva, az könnyen forgott mindkét irányban, szorulásról szó sincsen. A foghézag értéke olyan kicsi lett, hogy a fotón nem látható. A hajtómű működését nem befolyásolja.

8. ÖSSZEFOGLALÁS

A bemutatott esettanulmány alapján azt mondhatjuk, hogy a csigakerék rekonstrukciója sikeres volt. Az összeszerelt csigahajtómű megfelelően működik a gázfogyasztásmérőbe beépítve. Az Európai Unió gazdasága éppen a körforgásos gazdaságra való áttérés folyamatában tart, melynek egyik nagyon fontos eleme, hogy az eszközök megjavíthatók legyenek (10R egyik alapelem, Repair). A cikkben pontosan egy ilyen javítási folyamatot mutattunk be. A javítással egy néhány eurócentes alkatrész újragyártásával egy több 10 eurós értékű berendezést és vele együtt az abban található több kilónyi nyersanyagot megmentettük a hulladékká válástól, illetve megtakarítottuk a legyártásához használt energia nagy részét. Ehhez a feladathoz viszont korunk vezető technológiáit (CAD, 3D nyomtatás) kellett használni. Ez az apró példa is rámutat arra, hogy milyen fontos is lehet az új technológiák ismerete és használata napjaink gazdaságában.

9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők ez úton is szeretnének köszönetet mondani Dr. Sente József címzetes egyetemi tanárnak, a projekt során nyújtott szakmai segítségéért.

10. IRODALOM

- [1] SARKA F.: Examination of Acoustic Symptom in Wormgear, 4th International PhD Conference on Mechanical Engineering, Pilsen, Csehország, 2006
- [2] CZVIKOVSKY T., GAÁL J., NAGY P.: A polimertechnika alapjai. Budapest Műegyetemi Kiadó, 2000, ISBN 9789634206217
- [3] ZSÁRY, Á.: Gépelemek II. Budapest, Nemzeti Tankönyvkiadó, 1990.
- [4] PINTÉR Á., SARKA F.: CAD rendszerek által generált fogazott elemek alakeltérésének vizsgálata, GÉP 3-4 pp. 85-88., 2021, ISSN 3057-9473 (Online) | ISSN 0016-8572 (Nyomtatott).

- [5] VÁRKULI M., BOGNÁR G., SZENTE J.: Determination of tooth surface points on bevel gears for checking on a coordinate measuring machine, Design of Machines and Structures 13:1 pp. 131-139., 2023, ISSN 1785-6892 (Print), ISSN 2064-7522 (Online)

<https://doi.org/10.32972/dms.2023.011>

- [6] DÖMÖTÖR CS.: Alkatrész rekonstrukciós megoldások tapasztalatai 3D nyomtatással, GÉP 74:4 pp. 57-60., 2023, ISSN 3057-9473 (Online) ISSN 0016-8572 (Nyomtatott).

<https://www.gepujsag.hu/lapszamok/2023/04/gep-2023-4-13.pdf>

- [7] KRISTÁLY Á., FICZERE P.: Utilization of 3D Printing in Replacement of Basic Plastic Workpieces, International Journal of Engineering and Management Sciences / Műszaki és menedzsment tudományi közlemények 6:2, pp. 274-282., 2021, E-ISSN: 2498-700X

<https://doi.org/10.21791/IJEMS.2021.2.24>

- [8] ALZYOD H.; FICZERE P.: The Influence of the Layer Orientation on Ultimate Tensile Strength of 3D Printed Poly-lactic Acid, Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering 16:3 pp. 361-367., 2022, ISSN 1995-6665.

- [9] KÓNYA G., FICZERE P.: The Effect of Layer Thickness and Orientation of 3D Printed Workpieces, on The Micro- and Macrogeometric properties of Turned Parts, Acta Polytechnica Hungarica 21:2, pp. 231-250., 2024, ISSN 1785-8860

<https://doi.org/10.3311/PPme.21473>

- [10] MARADA I., BIHARI J.: Measuring the Effects of Faults for the Rotational Characteristics of Small Plastic Gears, Journal of Physics-Conference Series 2848:1 p. 012010, 2024, ISSN: 1742-6596

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2848/1/012010>