

ADDITÍVAN GYÁRTOTT POLIMER PRÓBATESTEK PIN-ON-DISK VIZSGÁLATA

EXPERIMENTAL PIN-ON-DISK STUDY ON ADDITIVELY MANUFACTURED POLYMERS

Zsibók Marcell*, Dr. Baka Ernő Zsolt**, Dr. Horák Péter***

ABSTRACT

*The aim of this work is to observe how contact pressure p and sliding speed v affect the thermal response of additively manufactured polymer specimens in a Pin-on-Disk setup. Cylindrical PLA, PETG, and ABS pins ($h=6$ mm, $d=5-10$ mm) were tested against a polymer disk at a track radius $R=25$ mm. For each test, the pin and the disk were made from the same material. Surface temperature was recorded during 6-minute dry runs. In the present series, the maximum temperatures mostly remained below 50 °C. Therefore a $p*v$ chart cannot be established. The preliminary observation is consistent with expectations: increasing normal load and rotational frequency leads to a higher temperature rise. Future measurements will extend the parameter range (smaller pin diameters, higher frequency) to reach the threshold region and enable construction of the chart. Determining these limits is necessary to define safe operating conditions for additively manufactured polymer components.*

*Keywords: Additive manufacturing; Pin-on-Disk; tribology; tribometer; dry friction; $p*v$ chart, FDM; PLA; PETG; ABS*

1. BEVEZETÉS

Az additív gyártást egyre gyakrabban alkalmazzák prototípus-fejlesztésben, mert viszonylag gyorsan és költséghatékonyan állíthatók elő egyedi vagy kis szériás alkatrészek [6]. Korábban ez a technológia elsősorban geometria ellenőrzésre szolgált. Napjainkra azonban jelentősen bővült az anyagválaszték. Megjelentek a töltőanyaggal megerősített filamentek is, pl. szénszállal, üvegszállal erősített típusok is [7]. Fogaskerekek esetén azonban nem elegendő pusztán a nagy szakítószilárdság. A méretezés kulcsa a felületi nyomás által keletkezett Hertz-féle érintkezési feszültség és a fogtókifáradás. Az érintkezési zónában pedig emelkedik a hőmérséklet. Polimer fogaskerekeknél ez a hőterhelés elsődlegesen korlátozza a használhatóságot; tipikus szerkezeti polimereknél (pl. PLA) már ~50–60 °C környékén észlelhető funkcionális romlás [9]. Egy konkrét műszaki

polimer ABS esetén 95-105 fok körül, már csökken a rugalmassági modulusz értéke [3]. Ez annak tudható be, hogy az ABS üvegesedési hőmérséklete (T_g) általában 95 és 105 Celsius fok közé esik [3].

A polimer fogaskerekek széles körű ipari bevezetését tovább nehezíti a nyomtatott felületek érdessége és azok méretpontossága. Fontos kiemelni a rétegirányból adódó anizotrópiát is, valamint a hőérzékenységet [7]. Mindemellett az így előállított fogaskerekeknek reális jövője van olyan alkalmazásokban, ahol a gyors előállítás, változatosság és kis szériás gyártás kiemelt fontos [8]. Ehhez azonban számos mérésre van szükség, hogy meghatározzuk a terhelés és fordulatszám tartományokat, amelyekben a nyomtatott polimerek üzemszerűen működtethetők.

Ezt a célt szolgálja a Pin-on-Disk (PoD) módszer: rögzített csapot (pin) definiált normálerővel egy forgó tárcsára nyomunk, és adott terhelés kombinációk esetén mérjük többek között a hőmérsékletváltozást [1]. A vizsgálatokból felépíthető a nyomás és kerületi sebesség szorzatán alapuló $p*v$ burkoló diagram, amely kijelöli a javasolt üzemi tartományt [2].

A próbatesteget és később a fogaskerekeket számos technológiával elő lehet állítani. Jelen dolgozatban az FDM (Fused Deposition Modeling) -technológia által kinyomtatott a próbatesteget használtunk. Az FDM-nek az előnye, hogy rendkívül sokat fejlődtek a próbatestek. [8]. Néhány filament esetén olyan mechanikai tulajdonságok érhetőek el, mintha az ötvözetlen alumínium lenne. Ebből is látszik, hogy van jövője az additívan gyártott fogaskerekeknek [4]. Meg kell azonban határozni, hogy milyen körülmények között érdemes őket használni és milyen célra [5]. A mérésnek az alábbiak a céljai:

- Hőterhelési viselkedés feltárása: additívan gyártott, 100% tömörségű, kontrollált rétegorientációjú polimer próbatestek hőmérséklet-emelkedésének vizsgálata különböző normálerő és frekvencia kombinációk esetén,
- $p*v$ burkológörbe felállítás: a nyomás és kerületi sebesség szorzatából kísérleti burkoló görbe meghatározása, amely alapján meghatározható a javasolt

* PhD Hallgató, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép és-Terméktervezés Tanszék

**Adjunktus, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép és-Terméktervezés Tanszék

***Egyetemi docens, Tanszékvezető Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép és-Terméktervezés Tanszék

üzemi terhelés és fordulatszám kombinációk fogaskerék-alkalmazásokhoz,

- geometriai paraméterek hatásának vizsgálata: a pin átmérő változtatásának hatása a hőmérséklet-válaszra és a $p \cdot v$ értékekre, ezek alapján összefüggéseket felállítani,
- anyagválasztás előszűrése: PLA, PETG és ABS próbatestek összehasonlítása (azonos geometria és mérési protokoll mellett), és a mérési eredmények alapján annak meghatározása, hogy mely anyag alkalmas további mérések elvégzésére.

2. ANYAGOK ÉS MÓDSZER

2.1. Próbatest geometria és gyártás

A mérés során három különböző anyagot vizsgáltunk PLA, PETG és ABS. A tárcsa és a pin anyaga megegyezett. A koptatás során mindig azonos anyagpárokkal dolgoztunk. Azonos beállítások lettek alkalmazva mindhárom anyag esetén. A pin magassága $h=6$ mm volt. Különböző átmérő sorozatokkal lett a mérés elvégezve [5,6,7,8,9,10 mm]. A réteg orientáció függőleges volt, a rétegnek a magassága pedig 0,2 mm. A kitöltési tényező 100 %-os volt.

2.2. Mérőberendezés ismertetése

Tárcsa: $\varnothing 130$ (mm), vastagság (t) $t=5$ (mm),

Mérőberendezés: Pin-on-Disk Tribométer (1. ábra),

Hajtómű: Ciklohajtómű, kimeneti fordulatszám ($n_{ki}=23,87$ rpm)

Adatgyűjtés: PMX típusú mérőerősítő, a mért értékek feldolgozása EVIDAS szoftver



1. ábra. Pin-on-Disk tribométer

A terhelést a látható rúdra helyezett súlyokkal állítjuk be. A tárcsa az acél korongra kerül, és csavarokkal rögzítjük. A pin a lineárisan megvezetett megfogóba kerül. A próbatestek belső átmérőjét úgy definiáltuk, hogy a megfogóba gyorsan, hézagmentesen és stabilan rögzíthetők legyenek. A méréshez felhasználtunk egy LM16 típusú Motovario frekvencia váltót, így a bemenő

fordulatszámot tetszőleges értékre tudjuk beállítani. Így egy a fordulatszám is egy plusz paraméter lesz, így nem csak a terhelés nagysága lesz a változó értékünk. A frekvencia váltót a motorral együtt láthatjuk a 2. ábrán. A hőmérséklet méréséhez fel lett használva egy ThermPro TP30 típusú infravörös hőmérő. A hőmérsékletet $\pm 1,5$ °C hibával. Ezt láthatjuk a 3. ábrán.



2. ábra. Motovario. LM16 frekvencia váltó



3. ábra. Infravörös digitális kijelzésű hőmérő

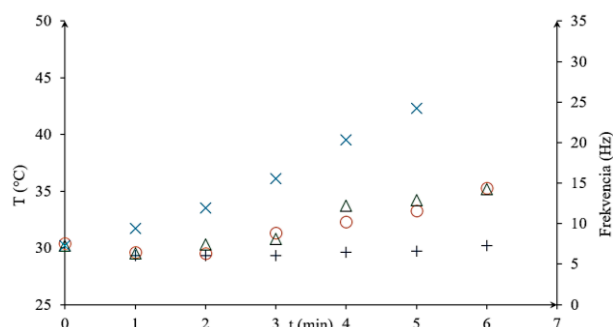
A mérés során először felhelyeztük a tömegeket és ezután 15 Hz frekvencián elindítottuk a motort. Majd percenként 5 Hz-es lépésként lett növelve a frekvencia, miközben a hőmérővel megkerestük a maximális hőmérséklet értékeket. A terhelés nem változott, csupán növeltük a frekvenciát. Amikor elértük a maximális frekvencia értéket, ezután visszaállítottuk a kezdeti 15 Hz-es frekvenciára. Ezután egy nagyobb tömeg lett ráhelyezve a rúdra és folytatódott a mérés. A mérés során azonban technikai okok miatt nem tudtunk 40 Hz frekvencia fölé menni. A terhelés során először 5 kg volt, melyet később fokozatosan növeltünk. A mérőberendezés maximálisan 30 kg-al (300 N) terhelhető. Miután egy mérési ciklus lefutott, az adatokat manuálisan és szoftveresen is dokumentáltuk.

2.3. Mérési eredmények

A mérés sorozatok során egyszer sem közelítettük meg a polimer anyagra jellemző üvegesedési hőmérsékletet, így a burkológörbét sem lehet még elkészíteni. Így a további mérések esetén érdemes kisebb átmérővel elvégezni a méréseket. Mert akkor kisebb felület és azonos terhelések esetén, hamarabb elérhetjük a határértékeket. A kiértékelés során minden egyes anyagpárhoz, egy-egy mérési adat lesz kiértékelve.

PLA:

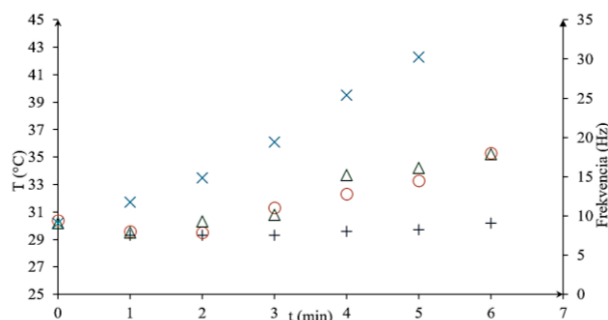
Először a PLA anyagból készült próbatestet vizsgáltuk. Azért ezzel kezdtünk, mert a PLA esetén tudjuk kikísérletezni a mérés alapjait. Az eredményeket ismerteti a 4. ábra. Azt a következtetést tudjuk levonni, hogy kis terhelés esetén a nagyobb fordulatszám sem igazán befolyásolja a hőmérséklet értékét. Azonban amennyiben jobban megterheljük, például 17 kg-akkor megfigyelhető, hogy nagyon gyorsan fog emelkedni a hőmérséklet. Ilyenkor azt tapasztaltuk, hogy nagyon gyorsan elkopott az alkatrész és a tárcsa deformációt is szenvedett.



4. ábra. PLA 5 mm pin mérési eredmények, +6 kg, ○ 10 kg, △ 15 kg, × 20 kg tömegekkel.

PETG:

Az előzetes elvárás, hogy a PETG jobban fogja bírni a terhelést, mint a PLA. Ugyanis a PETG-t felszokták használni műszaki célokra is [6]. Az eredményeket ismerteti az 5. ábra. Azonban jelentős változást nem tapasztaltunk a két anyag között. Érdemes további méréseket elvégezni. A PETG azért lenne jó választás műszaki szempontból, mert könnyen nyomtatható, így célszerű az ideális üzemelési tartomány meghatározása. Másrészt a PETG esetén az üvegesedési $T_g=85\text{ °C}$ [10]. Látható, hogy az általunk mért értékek, meg sem közelítik ezt a hőmérsékletet. A későbbiekben úgy kell meghatározni mind a terhelést, mind a fordulatszámot, hogy meg tudjuk közelíteni ezt az értéket.

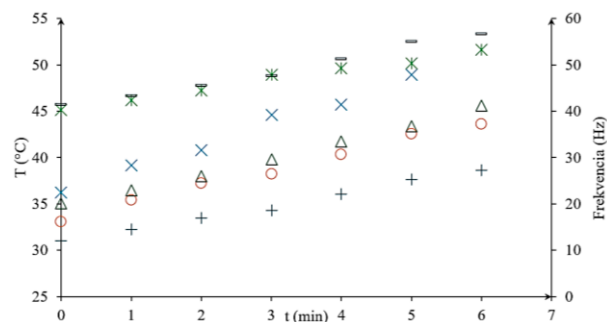


5. ábra. PETG 5 mm pin mérési eredmények, +6 kg, ○ 10 kg, △ 15 kg, × 20 kg tömegekkel.

ABS:

Az ABS esetén a kiértékelésnél a 10 mm átmérőjű PIN-hez tartozó adatokat értékeljük ki. Azért erre esett a választás, mert ebben az esetben, elértük a gépnek a maximális megengedett terhelhetőségét, ami jelen esetben 30 kg. Azonban azt tapasztaljuk, hogy nem látunk semmilyen kiugró értéket, vagy közel exponenciálisan növekvő hőmérséklet értéket. A nyomtatott próbatest a terhelést jól bírta, kopásnak szinte nyoma sem volt. Meg sem közelítette az ABS üvegesedési hőmérsékletét, ami $T_g=95\text{ °C}$ [9].

Az eredményeket láthatjuk a 6. ábrán. Az eredmények alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy a további méréseknél érdemes lenne az ABS-re helyezni a hangsúlyt.



6. ábra. ABS 10 mm pin mérési eredmények, +6 kg, ○ 10 kg, △ 15 kg, × 20 kg, × 25 kg, - 30 kg tömegekkel.

2.4. Próbatesten tapasztalt eredmények:

A kísérletek alapján az alábbi következtetéseket tudjuk levonni:

PLA: Amennyiben növeltük a fordulatszámot és növeltük a terhelést, a PLA nem tudta elviselni a terhelést. Nagyobb terhelés esetén szinte azonnal elkapott, a tárcsán nagy mértékű deformációt tapasztaltunk.

PETG: Nagyobb terheléseket el tudott viselni, mint a PLA jobban bírta. Jobban bírta a terhelést, kisebb mértékű kopást tapasztaltunk, mint a PLA esetén egységnyi idő alatt. Azonban nagyobb terhelés és fordulatszám esetén azt tapasztaltuk, hogy a próbatest gyorsan elkopott.

ABS: A három anyag közül az ABS a leginkább műszaki polimer. Azt tapasztaltuk, hogy a kopás szinte elhanyagolható volt. Ilyenkor tudtuk a legnagyobb terhelést kifejteni a próbatestre. A motor frekvenciája itt volt a legmagasabb. Azonban a mérőberendezés korlátja miatt nem tudtuk nagyobb fordulatszámon mérni.

3. ÖSSZEFOGLALÁS

A méréshez három különböző fajtájú additív technológiával előállított próbatestet használtunk fel. Az alábbi következtetéseket tudjuk megtenni:

PLA: Nem igazán alkalmas komoly műszaki feladat ellátásra, inkább a geometria ellenőrzésére jó, mert könnyen nyomtatható.

PETG: Amennyiben az igénybevétel nem jelentős, akkor alkalmas lehet műszaki feladatok ellátására. Az sem elhanyagolható szempont, hogy viszonylag könnyen nyomtatható.

ABS: Ez a leginkább alkalmas anyag nagyobb terhelések elviselésére, azonban további mérésekre van szükség, hogy az optimális üzemelési tartományt meghatározzuk.

A mérési sorozatnak köszönhetően kaptunk egy bizonyos fajta visszacsatolást, a jövőbeni irányokról. Következő lépésként definiáljuk a paramétereket. Két csoportba soroljuk őket, egyrészt nyomtatási paraméterek, ezekből kell definiálni azokat, amik a legjobban befolyásolják az alkatrész mechanikai tulajdonságait. Következő lépésként pedig azt vizsgáljuk, hogy miképpen befolyásolja a hőmérséklet, valamint a polimerek morfológiája az alkatrész terhelhetőségét.

4. SUMMARY

We used three types of additively manufactured polymer specimens in the measurements. Based on the current series the following preliminary conclusions can be drawn:

PLA: Generally not suitable for demanding engineering duties, better for geometry verification and quick prototyping due to easy printability.

PETG: Conditionally suitable for engineering tasks when loads are moderate, also relatively easy to print.

ABS: The most promising for higher loads among the tested materials. Further tests are required to delimit the optimal operating range.

The measurement campaign provides useful feedback for future work. As a next step, we will define the key parameters, grouped as follows. Printing parameters identify those that most strongly affect the mechanical properties (e.g., infill density, layer orientation, layer height, perimeter count). Material/thermal factors investigate how temperature and polymer morphology (e.g., crystallinity, T_g -related behavior) influence the load-carrying capacity of the parts.

5. IRODALOM

- [1] ASTM International (2023): ASTM G99-23: Standard Test Method for Wear and Friction Testing with a Pin-on-Disk or Ball-on-Disk Apparatus. West Conshohocken, PA: ASTM International. <https://www.astm.org/standards/g99>
- [2] Fraunhofer IST (2025.) Pin-on-Disk. Braunschweig: Fraunhofer Institute for Surface Engineering and Thin Films IST. <https://www.ist.fraunhofer.de/en/expertise/analytic-s-testing-technology/pin-on-disk.html>
- [3] NETZSCH Analyzing & Testing (2025) ABS: Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Copolymer — Polymer database (DSC, $T_g \sim 95-105$ °C typical). Selb: NETZSCH.: <https://analyzing-testing.netzsch.com/en-US/polymers-netzsch-com/commodity-thermoplastics/abs-acrylonitrile-butadiene-styrene-copolymer>
- [4] Rogers, K (2025) 'Is anyone printing gears using metal additive manufacturing?', Gear Solutions Magazine. <https://gearsolutions.com/features/is-anyone-printing-gears-using-metal-additive-manufacturing/>
- [5] Kónya, G. (2024) 'Investigating the Impact of Productivity on Surface Roughness and Dimensional Accuracy in FDM 3D Printing', Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 52(2), pp. 128–133. <https://www.pp.bme.hu/tr/article/view/22952>
- [6] igus GmbH (2025) 3D-printed gears from igus: <https://www.igus.com/custom-parts-services/3d-printing/3d-printed-gear>
- [7] Dong, C. and Davies, I.J. (2024) 'Mechanical properties of continuous glass fibre-reinforced composites made by material extrusion', Progress in Additive Manufacturing, 9, pp. 2131–2141 <https://link.springer.com/article/10.1007/s40964-024-00566-4>
- [8] Ciobanu, R., Rizescu, C.I., Rizescu, D. and Grămescu, B. (2024) 'Surface Durability of 3D-Printed Polymer Gears', Applied Sciences, 14(6), 2531 <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/6/2531>
- [9] NETZSCH Analyzing & Testing (2025) LA: Polylactide (Polylactic Acid). Glass Transition Temperature: 45–65 °C (DSC) <https://analyzing-testing.netzsch.com/en-US/polymers-netzsch-com/commodity-thermoplastics/pla-polylactide-polylactic-acid>
- [10] BigRep (2025) PETG 3D Printing Filament Technical Data Sheet. T_g (DSC): 85 °C [PETG 3D Printing Filament - High Resistance Material | BigRep](https://www.bigrep.com/en/3d-printing-filament/petg-3d-printing-filament-high-resistance-material)