

Additív gyártástechnológiák alkalmazhatóságának áttekintése fogazott gépelemek esetében

Overview of the applicability of additive manufacturing technologies for geared machine elements

RUZICKA Gábor¹, DR. CZÉGE Levente²

Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszék, 4028 Debrecen, Ótemető u.2-4., 0652 415 155,
<https://eng.unideb.hu/>

Abstract

The development of additive manufacturing technologies creates new opportunities for the machinery and processing industries. Compared to traditional methods, additive manufacturing technologies offer greater design freedom, material efficiency, and even shorter lead times. Due to technological advancements and decreasing costs, the application of this technology has expanded significantly in recent years. This trend is also reflected in the scientific literature on the subject. The aim of this study is to review recently published scientific works to identify current research directions and development achievements. Our literature research focuses on the topic of gears, primarily reviewing academic papers related to this field. The discussed articles present research findings on the applicability and limitations of additive technologies, shape optimization, material selection, mechanical properties, and manufacturing accuracy.

Keywords: Additive manufacturing, 3D printing, spur gear, application, review

Kivonat

Az additív gyártástechnológiák fejlődése új lehetőségeket teremt a gép- és feldolgozóipar számára. A hagyományos eljárásokkal szemben az additív gyártástechnológiák többek között nagyobb tervezési szabadságot, anyagtakarékosságot és akár rövidebb átfutási időt biztosítanak. A technológia fejlődésének és a költségek csökkenésének eredményeképpen a közelmúltban egyre szélesebb körben került alkalmazásra a technológia. Ez a tendencia a témával foglalkozó tudományos irodalomban is megfigyelhető. Ennek a tanulmánynak a célja a közelmúltban megjelent tudományos munkák áttekintése azzal a céllal, hogy felderítsük az aktuális kutatási irányokat és fejlesztési eredményeket. A szakirodalom kutatása során a fogaskerek témaköre volt az érdeklődésünk fókuszában, elsősorban az ebben a témában született szakcikkeket tekintjük át. A tárgyalt cikkek az additív technológiák alkalmazhatóságának lehetőségeivel és korlátaival, az alakoptimalizálással, az anyagválasztással, a mechanikai tulajdonságokkal és a gyártási pontossággal kapcsolatos kutatási eredményeket mutatják be.

Kulcsszavak: Additív gyártástechnológiák, 3D nyomtatás, fogaskerék, alkalmazás, áttekintés

1. BEVEZETÉS

Az additív gyártástechnológiák alkalmazása, közismertebb nevén 3D nyomtatás egyre fontosabb és feltörekvő technológia a korszerű gyártásban [1]. A hagyományos módszerekkel szemben számos előnyt kínál, melyek közül fontos a testreszabhatóság és a rugalmasság, ezáltal összhangban áll az Ipar 4.0 növekvő jelentőségével. A technológia alacsony anyagfelhasználása gazdaságos, fenntartható gyártási folyamatokat tesz lehetővé [2]. Az additív gyártás egy fejlett technológia, melyben az anyagot rétegenként építik fel 3D modelladatok alapján, ezáltal összetett geometriai formák és szerkezetek hozhatók létre. A technológia újszerű volta miatt különféle elnevezéssel illetik, például gyors prototípusgyártásnak, igény szerinti gyártásnak, digitális gyártásnak, asztali gyártásnak, szilárd szabadformájú gyártásnak, rétegyártásnak,

közvetlen gyártási technikának, illetve 3D nyomtatásnak is szokták nevezni. Az additív gyártásnak többféle módszere, technikája létezik, ezek a következők: szelektív lézerszinterezés (SLS), sztereolitográfia (SLA), digitális fényfeldolgozás (DLP), elektronnyalábos olvasztás (EBM), olvasztott huzalréteg-modellezés (FDM), multijet/polyjet 3D nyomtatás, szelektív lézeres olvasztás (SLM) és rétegelt objektumgyártás (LOM). Ehhez különböző anyagokat használnak, többek között kerámiát, műanyagot, fémeket, folyadékot, port [3]. Ezek a technológiák szinte bármilyen összetett 3D alkatrészt képesek előállítani, alaktól függetlenül a 3D modelladatok felhasználásával. A végső kívánt alkatrész geometriát az anyag rétegenkénti felépítésével hozzák létre, az adott modell réteggeometriájának megfelelően [3].

Ennek a tanulmánynak a célja a jelenlegi kutatási eredmények összefoglalása az additív eljárásokkal gyártott fogazott gépelemek, különösen a fogaskerek területén.

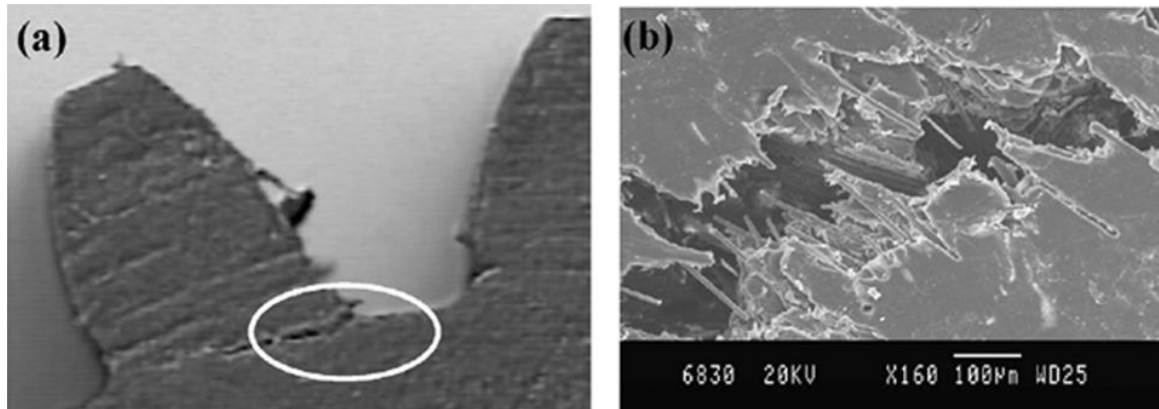
2. MŰANYAG ÉS NYOMTATOTT FOGASKEREKEK

A technológia fejlődésének köszönhetően a polimer alkatrészek egyre szélesebb körben alkalmazhatók [4]. Használatuknak számos előnye közül legfontosabbak az alacsony tömegre, a korrózióállóságra, a kopásállóságra, a rezgéselnyelésre, az elektromos szigetelésre, illetve gazdasági szempontot tekintve, az alacsony gyártási és anyagköltségekre vonatkozó tulajdonságuk. Azonban alkalmazásukkal korlátozottá válik a szerkezet teherbíró képessége. Kis darabszámú gyártás esetében célszerű alkalmazni az additív eljárásokat. Ez a technológia egyre szélesebb körben válik elérhetővé, ezért számos iparágban használják, mint például az autópárházban, a repülőgépiparban, az orvosi és az építészeti iparban egyaránt [5].

A 3D nyomtatás elterjedésével számos kutatás foglalkozott a nyomtatott alkatrészek tulajdonságaival és alkalmazási lehetőségeik feltérképezésével. Ezek közül az egyik tanulmány a polimer fogaskerek tervezési, alkalmazási és technológiai paramétereivel foglalkozik [6]. A cikkben tárgyalják a fröccsöntött alkatrészek tervezési folyamatát, az eredeti kétlépcsős számítási módszer alapján a diszperzióval töltött műanyagokból készült fogaskerek esetében. Szintén megtalálható benne a szimmetrikus és aszimmetrikus evolvens fogprofilok összehasonlítása, illetve ezek sajátosságai. [7] A következő tanulmány a 3D nyomtatás pontosságát mutatja be a különböző nyomtatási paraméterekkel, valamint színekkel, ezen technológiák méretpontosságát, illetve az eredeti modellel összehasonlított értékeket ismerteti. Összességében a PLA technológiával gyártott fogaskerek esetében kimutatható 98,81%-os méretpontosság és az FDM technológia esetében az anyag színéből adódó 7,24%-os súlykülönbség a sötétebb szín javára. A [8] esettanulmány szerzői az FDM gyors prototípusgyártás során elért méretpontosságot, síklapúságot és felületi érdességet határozták meg ABS-plusz modellanyag alkalmazásával. Itt a kísérletek során a két különböző sűrűséget (alacsony, tömör) és két rétegvastagságot (0,178 mm; 0,254 mm) alkalmaztak. Ezen feltételek mellett a legjobb méretstabilitást a maximális rétegvastagság (0,254 mm) és a tömör (100%) kitöltés kombinációja biztosította, viszont a legjobb felületi minőséget és a legkisebb síklapúsági hibát a kisebb rétegvastagság (0,178 mm) és a tömör (100%) kitöltés eredményezte. Ilyen módon meghatározták az FDM technológia és az ABS-plusz anyag optimális gyártási konfigurációját. Ugyanakkor egy másik cikk [9] beszámol az FDM eljárással készült fogaskerek zsugorodási és alakváltozási hajlamáról a gyártási folyamat során. A vizsgálat során egy 18 fogú, 3-as modulú ABS egyenes fogazású fogaskereket nyomtattak FDM technológiával, majd a geometriai eltéréseket 3D lézerszkennelvel mérték. A zsugorodás megfigyelhető a reteszhornyoknál, a középső furatnál és a fogak csúcsainál, melynek legnagyobb mértéke a reteszhornyok sarkában jelentkezett, 0,497 mm volt. A fog alaptartományában tágulás volt tapasztalható, 0,388 mm maximális értékkel. Vetemedés következett be a fog csúcsához közeli alsó élen, 0,489 mm legnagyobb eltéréssel. A következő tanulmány [19] a sztereolitográfiával gyártott különböző modulú fogaskerek geometriai pontosságát vizsgálja. A vizsgálat során a mért értékek maximuma és minimuma közötti különbség egy esetben sem haladta meg a 70 µm-t. Ez alapján elmondható, hogy $m > 0,7$ mm modulnál az SLA-eljárás alkalmas lehet műanyag fogaskerek gyártására nem precíziós hajtásokban való alkalmazás esetén. A [22] cikk kimutatta, hogy az $m < 1$ mm modulú FDM fogaskereket nem lehet megfelelő pontossággal gyártani.

A polimer fogaskerek-hajtások területén eddig főleg a fröccsöntött polimer fogaskerek alkalmazása volt elterjedt. Elsősorban kis teljesítményű hajtások elemeiként alkalmazzák, ahol nem követelmény a nagy nyomatékátvitel, hanem a megfelelő kinematikai viszonyok létrehozása a cél. Ezekre jelentős igény van az autópárházban, a textiliparban, az élelmiszeriparban, stb. A [10] következő tanulmány a műanyag fogaskerek érintkezési feszültségét értékeli nagy terhelésű körülmények között. A műanyagok erős mechanikai és kémiai ellenállóképessége magas hőmérsékleten is megmarad. Az [11] alábbi cikk átfogó áttekintést nyújt a polimer egyenes fogazású fogaskerekkel kapcsolatos kutatásokról, melyek alacsony (0-8 Nm) és közepes

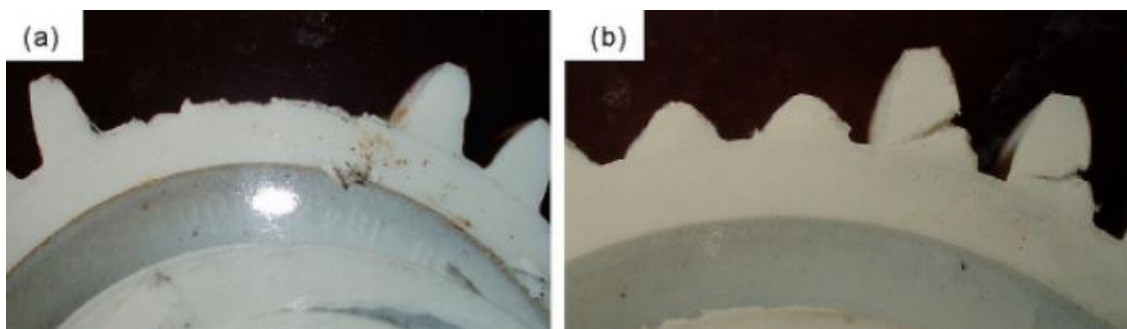
(8-17 Nm) terhelési körülmények között működnek. Ezzel együtt bemutatja az eddig alkalmazott különböző polimereket és polimer kompozitokat, valamint eltérő üzemi körülményeiket. Ismerteti a különböző tervezési jellemzőit és a fogprofil módosítási technikákat, melyek javítják teljesítményét és tartósságát.



1. ábra. Fogárok repedés nylon 66 típusú fogaskeréken: (a) optikai mikroszkópos felvétel a repedés helyéről és (b) pásztázó elektronmikroszkópos felvétel a repedés útjáról [18]

Továbbá, a [14] következő tanulmány az öntött acél és a kompozit anyagok ütközéselemzését, valamint nyomatéktérhelését vizsgálja, végül összehasonlítást végez az imént említett anyagból készült elemek között. A vizsgálat eredményeképpen elmondható, hogy autók sebességváltóiban, akár 1,5 kN terhelésig, a Tata Super Ace modell esetében, a kompozit fogaskerekek jobb teljesítményt nyújtanak a jelenleg használt öntött acél fogaskerekekkel szemben.

Az additív gyártási területen egyes tanulmányok a nyomtatott fogaskerekek szilárdsági tulajdonságaival, teherbírásával és kopásával foglalkoznak. A [12] soron következő cikk a fogaskerék-meghibásodásokat (kopás, kifáradás, felületi kilyukadás) ismerteti, illetve különböző anyagokból készült fogaskerekek viselkedését vizsgálja, figyelembe véve a szilárdságot, kopásállóságot és élettartamot.



2. ábra. Kompozit fogaskerék meghibásodás (a) 500 rpm (b) 1000 rpm fordulatszámon [11]

A [13,16] tanulmány szerzői a különböző anyagból készült fogaskerekek (Alumínium, Epoxigyanta és szilícium-karbid) élettartamát vizsgálja különböző üzemi körülmények esetében. A vizsgálat tárgya volt a tömegcsökkentés, feszültségeloszlás, rezgéscsökkentés az epoxigyanta és szilícium-karbid anyagok alkalmazásával, illetve kompozit fogaskerekek összehasonlítása és elemzése az imént felsorolt anyagokkal. A cikk javaslatot tesz az egyes anyagok alkalmazási területére is, miszerint az említett anyagok felhasználásával autóiipari alkalmazások szintén elérhetőek. A következőkben [15] értesülhetünk egy 3D nyomtatás segítségével létrehozott PLA fogaskerék kopási tesztjéről, melyet egy St37-2 acél fogaskerékkel együtt vizsgáltak. Különböző terhelések és fordulatszámok mellett megállapították a keletkezett kopásmélységet koordináta-mérőgép segítségével és arra a következtetésre jutottak, hogy a fogaskereket érő terhelés növekedésével a kopás fokozódik, míg a fordulatszám emelkedésével a csökken a mértéke. Így elmondható, hogy 3D nyomtatással készült fogaskerekek alacsony terhelés mellett könnyű és korrózióállóságot igénylő területeken sikeresen alkalmazhatók. Az [18] alábbi tanulmányban a különböző

3D nyomtatási technológiával gyártott egyenes fogazatú fogaskerekek működési jellemzőire gyakorolt hatását elemezték az alkalmazott anyag típusának függvényében. Az elvégzett kísérletek alapján elmondható, hogy a PLA anyagból készült fogaskerekek jobb működési jellemzőkkel rendelkeznek, mint az ABS anyagból készült fogaskerekek. A következő cikkben [20] a szerzők műanyag fogaskerekek osztáshibáit elemezték a húzónyomaték mérésével, ezért olyan fogaskerekeket gyártottak, melyek egyik fogát tangenciálisan enyhén elmozdították. Kimutatták, hogy az osztás csökkenésével a nyomaték növekszik, míg az osztás növekedésével a nyomaték csökken. A [21] tanulmányban a kutatás a PVC, PA és POM anyagból készült fogaskerekeket vizsgálta. Az eredmények a PVC fogaskerekek jobb alkalmazhatóságát mutatták.

3. ÖSSZEFOGLALÓ

Az additív gyártástechnológiával és műanyagból készült gépelemek alkalmazása, különös tekintettel a fogaskerekekre, számos előnyt rejt magában, melyek bizonyítására több, a témával foglalkozó tudományos folyóiratcikket, konferenciakiadványt, könyvet gyűjtöttünk össze. A bemutatott tanulmányok foglalkoznak a tervezési folyamattal, a gyártás pontosságával, az alakoptimalizálással, az alkalmazási lehetőségekkel, azok előnyeivel és korlátaival, az élettartammal, különböző meghibásodási folyamatokkal, kopással, vetemedéssel.

Az összegyűjtött cikkek és tanulmányok egymással összhangban állnak és arra engednek következtetni, hogy az additív gyártástechnológiával létrehozott fogaskerekek egyre növekvő alkalmazásának létjogosultsága indokolt, azok előnyeit és korlátait ismerve.

A tanulmány célja az eddigi kutatási eredmények felderítése és a kutatási irány kijelölése. A szakirodalmakat tekintve, az alakoptimalizálás, az anyagválasztás és az optimális paraméterek keresése szabad területek.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] S. H. Khajavi; J. Partanen; J. Holmström. *Additive manufacturing in the spare parts supply chain*, Computers in Industry, Volume 65, Issue 1, 2014, ISSN 0166-3615, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2013.07.008>.
- [2] C.K. Chua, K.F. Leong, J. An.: *Rapid prototyping of biomaterials*, Woodhead Publishing, Cambridge, 2014.
- [3] R. Kumar, M. Kumar, J.S. Chohan.: *The role of additive manufacturing for biomedical applications: A critical review*, Journal of Manufacturing Processes, Elsevier, 2007. Április, (64), 828-850.
- [4] Shil'ko, Serge; V.E., Starzhinsky. *Polymer Gears: Design, Technology, Application (Review)*, Actual Problems of Machine Science, 2019.
- [5] Wohlers, T. *Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry*. Wohlers Associates, Fort Collins, 2013.
- [6] Serge V. Shil'ko. *Polymer Gears: Design, Technology, Application (Review)*, ResearchGate, 2019
- [7] Muammal M. Hanon, László Zsidai, Quanjin Ma, *Accuracy investigation of 3D printed PLA with various process parameters and different colors*, Materials Today: Proceedings, Elsevier, 2021, 42(5), 3089-3096.
- [8] P.J. Nuñez, A. Rivas, E. García-Plaza, E. Beamud, A. Sanz-Lobera, *Dimensional and Surface Texture Characterization in Fused Deposition Modelling (FDM) with ABS plus*, Procedia Engineering, Elsevier, 2015, 132, 856-863.
- [9] J. Liu, K. Feng, Z. Su, B. Ren, Y. Liu, *Dimensional Deviations and Distortion Mechanism of Polymer Spur Gear Fabricated by Fused Deposition Modeling*, Journal of Materials Engineering and Performance, ASM International, 2024, DOI: 10.1007/s11665-024-09321-w.
- [10] R. Kumar, *Finite element stress and deflection analysis of plastic spur gears under different speed conditions*, OSF Preprints, 2024, DOI: 10.31219/osf.io/7bnpr.
- [11] A. Kumar Singh, Siddhartha, P. Kumar Singh, *Polymer spur gears behaviors under different loading conditions: A review*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, Volume 232, Issue 2, 2017, DOI: 10.1177/1350650117711595
- [12] L. Pujari, S. Manoj, Omkar K. Gaddikeri, P. Shetty, Mantesh B. Khot, *Recent advancements in 3D printing for gear design and analysis: a comprehensive review*, Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design, Volume 7, 2024, 4979–5003, DOI: 10.1007/s41939-024-00529-w.
- [13] Prajwal V. Gedam, Dr. Anil Kumar, Dr. Nitin A. Wankhade, *Investigation and Analysis of Spur Gear Using Different Composite Materials - review paper*, International Journal of Engineering Research and Applications, Vol. 13, Issue 4, April 2023, 54-59, ISSN: 2248-9622.
- [14] S. Mahendran, K. M. Eazhil, L. Senthil Kumar, *Design and Analysis of Composite Spur Gear*, IJRSI, Volume I, Issue VI, November 2014, ISSN 2321-2705.

- [15] M. S. Tunalioglu, T. Torun, *The investigation of wear on three-dimensional printed spur gears*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, Volume 235, Issue 6, First published online June 22, 2021, DOI: 10.1177/09544089211027732.
- [16] Mahendran, K.M.Eazhil, L.Senthil Kumar *Design and Analysis of Composite Spur Gear*, Sound Vibr., 2014, ISSN2321-2705
- [17] DIMIĆ A., MIŠKOVIĆ Ž., MITROVIĆ R., RISTIVOJEVIĆ M., STAMENIĆ Z., DANKO J., BUCHA J., MILESICH T., *The influence of material on the operational characteristics of spur gears manufactured by the 3D printing technology*, Journal of Mechanical Engineering – Strojnicky časopis, VOL 68 (2018), NO 3, 261-270.
- [18] Senthilvelan S, Gnanamoorthy R. *Damage mechanisms in injection molded unreinforced, glass and carbon reinforced nylon 66 spur gears*. Appl Compos Mater 2004; 11: 377–397.
- [19] Marada I, Bihari J. Sztereolitográfiával gyártott műanyag fogaskerekek pontosságának vizsgálata. *Multidiszciplináris Tudományok* 2024; 14 (4): 74–81. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2024.4.7>
- [20] Marada I, Bihari J. Kisméretű műanyag fogaskerekek osztáshibáinak vizsgálata. *Gép* 2024; 3(4): 14. <https://doi.org/10.70750/GEP.2024.3-4.14>
- [21] Odrobina M, Keresztes RZ, Kalácska G. Hőre lágyuló műszaki műanyag fogaskerekek élettartama. *XXIX. Nemzetközi Gépészeti Konferencia*, 2021.
- [22] Marada I, Csörgő ZL, Kovács S. FDM nyomtatott PLA és kenderszál erősített PLA fogaskerekek pontosságának vizsgálata. *XXXII. Nemzetközi Gépészeti Találkozó*, 2024