

A FELÜLETI MIKROSTRUKTURÁLÁS HATÁSA A POLIPROPILÉN KIFÁRADÁSÁRA IV-ES TÍPUSÚ HIDROGÉNTARTÁLYOKBAN

INFLUENCE OF SURFACE MICROSTRUCTURING ON THE FATIGUE RESISTANCE OF POLYPROPYLENE IN TYPE IV HYDROGEN STORAGE VESSELS

Kun Krisztián <https://orcid.org/0000-0001-7194-3581>¹, Kis Dávid István <https://orcid.org/0000-0001-8265-956X>^{2*}

¹ Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, 6000 Kecskemét, Izsáki út 10.

² Gépjárműtechnológia Tanszék, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

<https://doi.org/10.47833/2024.3.ENG.011>

Kulcsszavak:

Hidrogéntároló rendszer
Hidrogéntartály
Polimer bélés
Lézeres abláció
Kifáradás

Keywords:

Hydrogen storage system
Hydrogen tank
Polymer liner
Laser ablation
Fatigue

Cikktörténet:

Beérkezett 2024. november 11.
Átdolgozva 2024. november 20.
Elfogadva 2024. november 25.

Összefoglalás

A hidrogénalapú közlekedés egyre nagyobb jelentőséget kap a zéró-emissziós célok elérésében. A hidrogéntároló rendszerek, például a IV-es típusú hidrogéntartályok hatékonysága és biztonsága kulcsfontosságú tényezők a hidrogéntechnológiák járművekbe való integrációjában. Jelen kutatás célja a polimer bélések megbízhatóságának javítása olyan felületmódosítási technikákkal, amelyek növelik az anyagok kifáradással szembeni ellenállását. A fröccsöntőszerszámok femtoszekundumos lézeres ablációval történő felületkezelésének szerepét vizsgáltuk, amelyek segítségével a polimer anyagok mechanikai teljesítménye optimalizálható a ciklikus terhelésekkel szemben. Az elemzés során különböző fröccsöntött próbatesteken végzett fárasztóvizsgálatok alapján értékeltük a polimerek kifáradási határát, különös tekintettel a nagy teljesítményű alkalmazások követelményeire. A kutatás eredményei hozzájárulhatnak a hidrogéntároló rendszerek hosszú távú megbízhatóságának és biztonságának növeléséhez, különösen a hidrogénhajtású járművek esetében, melyek fokozott követelményeket támasztanak az anyagok kifáradási ellenállásával szemben.

Abstract

Hydrogen-based transportation is gaining increasing importance in achieving zero-emission goals. The efficiency and safety of hydrogen storage systems, such as Type IV hydrogen tanks, are critical factors in integrating hydrogen technologies into vehicles. This research aims to improve the reliability of polymer liners through surface modification techniques that enhance material resistance to fatigue. We examined the role of surface treatment of injection molds with femtosecond laser ablation, which enables the optimization of the mechanical performance of

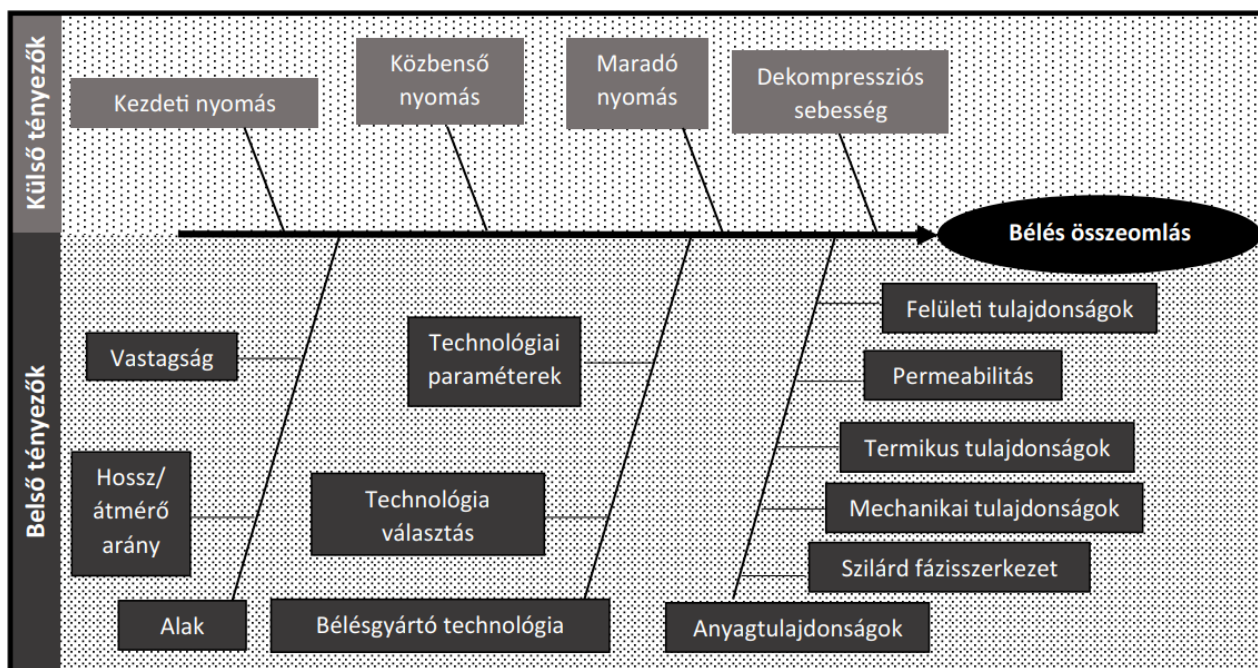
* Kapcsolattartó szerző. Kis Dávid
E-mail cím: kis.david@nje.hu

polymer materials under cyclic loads. Our analysis assessed the fatigue limit of polymers through fatigue tests conducted on various injection-molded specimens, with a particular focus on the requirements of high-performance applications. The research results can contribute to the long-term reliability and safety of hydrogen storage systems, especially in hydrogen-powered vehicles, which place increased demands on the fatigue resistance of materials.

1. Bevezetés

A hidrogéntechnológia kulcsjelentőségű a zéró-emissziós közlekedés megvalósításában [1], [2], [3]. A hidrogén tüzelőanyagcellák ígéretes alternatívát kínálnak a hagyományos belső égésű motorokkal és az akkumulátoros elektromos járművekkel szemben, mivel magas energiasűrűséget és gyors töltési képességet biztosítanak [4], [5], [6]. Azonban a hidrogéntechnológia sikeres integrációja az autóiipari alkalmazásokban nagymértékben függ a megbízható gáztárolórendszerek, például a IV-es típusú hidrogéntartályok fejlesztésétől, amelyek polimer bélést használnak külső kompozit rétegekkel megerősítve. A mikrostruktúra szintjén végzett felületmódosítások jelentősen javíthatják a bélés-kompozit határfelület mechanikai összekapcsolódási és tapadási tulajdonságait. Berczeli (2018) kimutatta, hogy a fejlett felületmódosítási technikák javíthatják a polimerek és a kompozit anyagok közötti tapadás erősségét, alkalmassá téve azokat nagy igénybevételű környezetekben, például hidrogéntároló rendszerekben [7] [8]. Továbbá, Weltsch és kollégái 2024-es tanulmányukban megállapították, hogy a femtoszekundumos lézeres abláció pontosan szabályozhatja a polimer felület mikrostruktúráját, optimalizálva a polimer és a kompozit közötti interfészt, miközben javul a tapadás és a kifáradással szembeni ellenállás [8]. A kifáradási határ kritikus tényező a polimer alkatrészek hosszú távú megbízhatóságában az autóiipari alkalmazásokban. S. Mortazavian és munkatársai (2015) hangsúlyozták, hogy bár a polimerek mechanikai tulajdonságai jól dokumentáltak, fáradási jellemzőiket gyakran figyelmen kívül hagyják [9]. Ez a hiányosság különösen jelentős az autóiipari alkalmazásokban, ahol az alkatrészek ismétlődő igénybevételeknek vannak kitéve, így a hidrogéntároló rendszerekben is. Ahmadifar és társai publikációjukban rámutattak, hogy a polimer alkatrészek fáradási viselkedésének megértése elengedhetetlen a hidrogénhajtású járművek biztonságának és tartósságának biztosításához [10].

Kis és munkatársai (2023) irodalomösszegző publikációjukban hangsúlyozták a polimer bélés és a kompozit héj közötti integritás fontosságát a IV-es típusú hidrogéntartályok szélsőséges üritési viszonyok által keltett bélés összeomlásának megelőzésében [11]. Ha az alacsony hidrogén-permeabilitás gyors gázüritési sebességgel párosul, a bélés összeomlása következhet be. Miután a tartályt hidrogénnel töltötték fel, a gáz egy része átdiffundál a bélésen, és a bélés és a kompozit rétegbe bejutó hidrogén egyensúlyi nyomást ér el. Az üritéssel fellépő nyomáscsökkenés nyomáskülönbséget eredményez, amely meghaladhatja a bélés anyagának permeabilitási és termomechanikai korlátai által meghatározott feszültséghatárt, és a bélés összeomlik. A bélés összeomlásához vezető tényezők többkomponensűek, és két csoportra oszthatók: külső és belső tényezők, amelyeket az 1. ábra foglal össze. A külső tényezők az ürités körülményeivel kapcsolatosak, mint például a nyomásváltozás sebessége és a kezdeti nyomás. A belső tényezők a tartály kialakításával kapcsolatosak, mint a bélés dizájnjá, gyártástechnológiája és anyaga.



1. ábra. Ishikawa-diagram a liner összeomlását befolyásoló tényezőkkel

A hidrogéntartályok béléseként elsősorban olyan polimerek alkalmazhatók, amelyek gázáteresztő képessége alatta marad a szabványban meghatározott felső határértéknek. Ha a hidrogéntartályok szabványban meghatározott legnagyobb hidrogén permeabilitás határértékét átszámítjuk a bélésre, az anyag megengedett hidrogéngáz-permeabilitási együtthatója $1,24 \times 10^{-15}$ mol/(m·s·Pa) értékre jön ki [12], [13]. Schultheiss PhD értekezésében összefoglalt permeabilitás adataiból látható, hogy a polipropilén permeabilitása a 10^{-15} mol/(m·s·Pa) nagyságrenden van, ami miatt a polipropilén alkalmas anyagválasztás lehet 4-es típusú hidrogéntartály-bélések fejlesztésére [14]. Emellett a polipropilént jó mechanikai tulajdonságok, kémiai stabilitás, könnyű feldolgozhatóság és újrahasznosíthatóság jellemzi. A polipropilén felületkezelése, és a különböző mikrostrukturájú konfigurációk mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatásának elemzésével a kutatás célja, hogy betekintést nyújtson a polipropilén alapú hidrogéntartályok optimalizálásába a fejlett hidrogén-alapú autóiipari alkalmazásokhoz.

2. Módszer

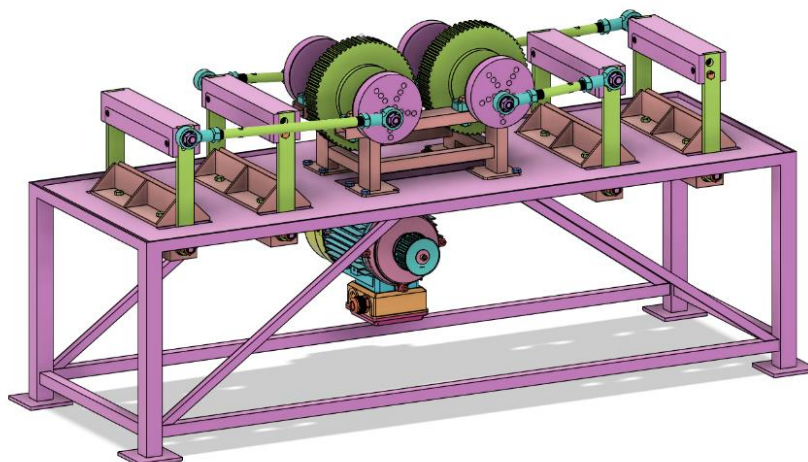
A műanyagok gyors terjedése különböző területeken, különösen az autóiiparban és a repülőgépiparban, figyelemre méltó. Annak ellenére, hogy egyre több műanyagot használnak, a polimerek anyagtulajdonságainak megértése kevésbé átfogó a fémekhez képest. A mérnöki műanyagok jól meghatározottak olyan tulajdonságok tekintetében, mint a szakítószilárdság, a nyúlás és a Young-modulusz. Ugyanakkor a ciklikus terheléssel szembeni ellenállásuk, vagyis a fáradási viselkedésük kevésbé kutatott. Ez különösen fontos, mivel sok műanyag alkatrészt ismétlődő mechanikai igénybevétel ér élettartamuk alatt, ami befolyásolja azok teljesítményét. Ennek következtében elengedhetetlenek a pontos és megbízható módszerek ezen tulajdonságok meghatározására a modern kutatásokban. A polimerek fáradása gyakran a folyáshatár alatti ciklikus feszültségek hatására következik be, és idővel meghibásodáshoz vezet. Ezeket a meghibásodásokat nagyciklusú fárasztóvizsgálatokkal (amely elsősorban elasztikus körülmények között történik), illetve kisciklusú fárasztóvizsgálatokkal (amelyet az elasztikus és plasztikus deformáció kombinációja jellemez) lehet vizsgálni. A kisciklusú fárasztóvizsgálatokat elsősorban fémeknél alkalmazzák, amely során a termékek lokális feszültséggyűjtő pontjainak ciklikus képlékeny alakváltozása által okozott anyagfáradást és repedésképződést vizsgálják [15]. Ez a módszer műanyagoknál kevésbé alkalmazható, mert nem képesek a fémekhez hasonló mértékű képlékeny felkeményedésre és stabil ellenállásra magas amplitúdójú ismétlődő alakváltozás mellett. A nagyciklusú, azaz rugalmas határ alatti fárasztóvizsgálat azonban alkalmazható műanyagok

esetén is, néhány speciális körülmény figyelembevételével. A fémekkel ellentétben, amelyek az elasztikus határon belül állandó rugalmassági moduluszt mutatnak, a polimerek nagyobb belső csillapítással és alacsonyabb hővezető képességgel rendelkeznek. Ez azt eredményezi, hogy a próbatest jelentősen felmelegszik ciklikus terhelés alatt, még alacsony frekvenciákon is. A hőmérséklet emelkedése csökkentheti a moduluszt, ami hatással van az anyag mechanikai tulajdonságaira és teljesítményére. Továbbá, a polimerek, különösen az additív gyártásban [16], [17] nem rendelkeznek olyan jól meghatározott fáradási határral, mint a fémek. Ehelyett a polimerek fárasztóvizsgálatát általában egy bizonyos ciklusszámig - gyakran 10^7 ciklusig - végzik, hogy meghatározzák az adott körülmények (például frekvencia, hőmérséklet és páratartalom) közötti kifáradási határfeszültségeket. Ennek ellenére a polimerek kifáradási viselkedésének átfogó és szabványosított értékelési módszerei hiányoznak. A jelenlegi gyakorlatok elsősorban az anyaggyártók által szolgáltatott adatokra támaszkodnak, korlátozott empirikus érvényesítéssel. Ennek következtében szükség van rendszerezett és alapos kutatásra a polimerek fáradási jellemzőinek megbízható meghatározási módszereinek kidolgozására, különösen olyan alkalmazásokhoz, amelyek nagy mechanikai teljesítményt igényelnek ciklikus terhelés alatt [18]. Ennek az ismerethiánynak a kezelése elengedhetetlen a polimerek térhódításához kritikus alkalmazásokban, például autópárhajalkatrészekben és hidrogéntároló rendszerekben, ahol a megbízható anyagteljesítmény alapvető fontosságú. Robusztus tesztelési módszerek kidolgozása és a polimerek fáradási jelenségeinek megértése lehetővé teszi tartósabb és hatékonyabb alkatrészek fejlesztését, amelyek megfelelnek a modern mérnöki alkalmazások egyre növekvő követelményeinek [10].

Ebben a kutatásban egy speciális fröccsöntő szerszámot használtunk, amely két standard hajlítós próbatestet állít elő. Célunk az volt, hogy mikrostruktúrákat hozunk létre az állószerkezeten, amelyek különböző hatással lennének az olvadáráramlásra a fröccsöntési folyamat során. A polimer olvadék befolyásolása érdekében barázdákat alakítottunk ki mind az áramlás irányára merőlegesen, mind azzal párhuzamosan. A fröccsöntés során a szerszámüreg bonyolult, kiterjedt áramlással töltődik fel, ami egy héj-mag szerkezet kialakulását eredményezi, amely a folyamatparaméterektől függően változik. A tanulmány célja a szerszámfelületen létrehozott mikrostruktúrák különböző próbatestek fáradási teljesítményére gyakorolt hatásának vizsgálata. A szerszámfelületen létrehozott mikrostruktúrák közvetlen hatással lehetnek az öntött termék belső anyagszerkezetére, és közvetve befolyásolhatják a hozzá kapcsolódó elemek, például a kompozit rétegek kötési szilárdságát. Ezen hatások megértése alapvető fontosságú a fröccsöntött alkatrészek mechanikai tulajdonságainak és tartósságának optimalizálásához, különösen a magas teljesítményt igénylő alkalmazásokban.

2.1. Fárasztó gép

A fárasztógép (2. ábra) a rezonancia elvén működik, ami azt jelenti, hogy a próbatest és a hozzá csatlakoztatott rögzítő feltét oszcilláló rendszert alkot a vizsgálógépen belül. Ez a beállítás lehetővé teszi a ciklikus terhelési feltételek pontos reprodukálását, biztosítva, hogy a gép frekvenciája pontosan megfeleljen a tesztadarabok saját frekvenciájának. A gép mechanikusan viszi át az alkalmazott terhelést a próbatestre, szimulálva a valós fáradási körülményeket. Ez a módszer rendkívül hatékony a kifáradás vizsgálatára kontrollált és megismételhető körülmények között, ami elengedhetetlen a pontos kifáradási határ méréséhez. A Neumann János Egyetemen található polimer fárasztóvizsgáló gépet Fodor és társai tervezték úgy, hogy az szabványos szakítópróbatétek fogadására lett kialakítva [19].



2. ábra. A fárasztógép CAD modellje

A vizsgálati frekvencia 5 Hz-re volt beállítva, ahogy azt az irodalom [19] javasolta. Az első fázisban a példányokat 1,000 ciklusnak vetettük alá, ezt követte a második fázisban 10,000 ciklus, a harmadik fázisban 100,000 ciklus, végül pedig az utolsó fázisban 1,000,000 ciklus. A vizsgálat során alkalmazott hajlítási amplitúdó 10 mm volt. Minden fárasztási tesztet szobahőmérsékleten végeztünk. A fárasztóvizsgálat során (3. ábra) bekövetkező hőmérsékletváltozások észlelésére a próbatesteket hőkamerával figyeltük meg. A kívánt hajlítási amplitúdót az erőátvitel tengelyeire szerelt excentrikus tárcsák állításával értük el, lehetővé téve a terhelési feltételek pontos szabályozását. Az egyes fázisokat követően a próbatesteket Instron 3366 univerzális anyagvizsgáló gépen, hárompontos hajlítással vizsgáltuk elemezve a maximális hajlítóerő változását.

A strukturált felületek hatásának referenciájának megállapítása érdekében egy köszörült felületű szerszámmal is előállítottunk próbatesteket. Ez lehetővé tette a strukturált és nem-strukturált szerszámfelületek összehasonlítását, biztosítva az alapot a mikrostruktúrák mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatásának értékeléséhez. Típusonként 25 mintát hasonlítottunk össze.

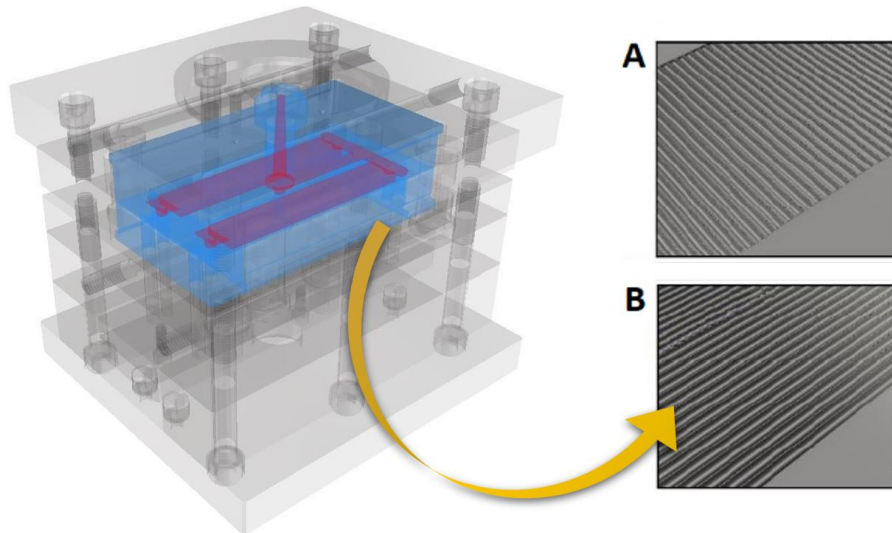


3. ábra. Folyamat közbeni fénykép a fárasztási tesztőről

2.2. Lézerrel strukturált fröccsöntőszerszám-üreg

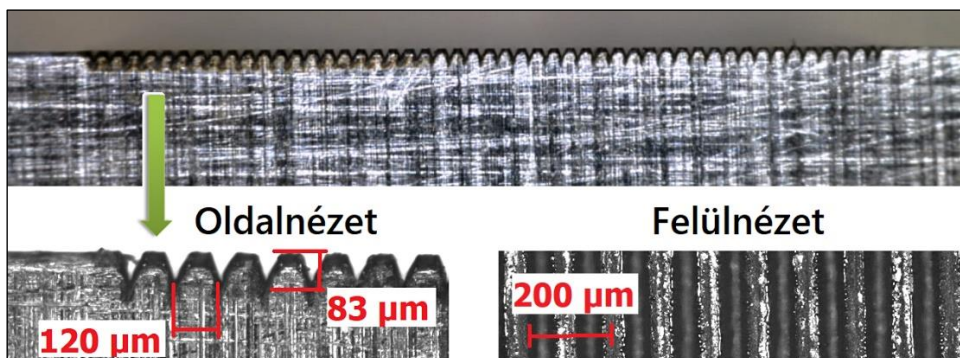
A felületkezelést egy Monaco 1035-80-40 típusú ipari femtoszekundumos lézerrel hajtottuk végre, amely LINOS F-Theta-Ronar szkenneló optikával és $f=254$ mm fókusztávolságú lencsével van felszerelve. A lézer teljesítményét az irodalom [7], [8] alapján kalibráltuk, azzal a céllal, hogy olyan mikrostruktúra mélységet érjünk el, amelyek befolyásolják a polimer áramlását a fröccsöntés során. Az impulzusenergia és a szkennelési sebesség révén a mikrostruktúrák mélysége és alakja pontosan szabályozható, ezáltal hatással van az anyagáramlás viselkedésére, és következésképpen a végtermék mechanikai tulajdonságaira is.

A szerszámfelületen létrehozott, a polimer olvadékáramlásával párhuzamos vagy arra merőleges barázdák eltérő hatással lehetnek a fröccsöntött termék végső tulajdonságaira (4. ábra). A folyásiránnyal párhuzamosan elhelyezkedő barázdák javíthatják például a szakítószilárdságot és a merevséget mind a növelt inercia, mind pedig a kedvező áramlási viszonyok és a fal menti irányított áramlás miatt. Ezzel szemben, a folyásirányra merőleges barázdák a kitöltés nehézsége ellenére az ömledék eltérő hűlése olyan belső szerkezetet hozhat létre, amely növelheti a szívósságot [20-21].



4. ábra. A fröccsöntőszerszám és annak mikrostrukturált ürege: A – merőleges a folyásirányra, B – párhuzamos a folyásiránnyal

A fröccsöntő üreg felületén a folyásiránnyal párhuzamosan és merőlegesen orientált mikrobarázdák létrehozása után (5. ábra) a kezelt területet egy Keyence VHX-2000 digitális mikroszkóppal elemeztük, hogy ellenőrizzük a barázdák mélységét. A vizsgálatok átlagosan $83\ \mu\text{m}$ mélységet mutattak ki. Ez a mélység mind a folyás irányával párhuzamos, mind pedig merőleges felületkezelésű részeken megfigyelhető volt.



5. ábra. Mikroszkopikus kép az üreg felületéről

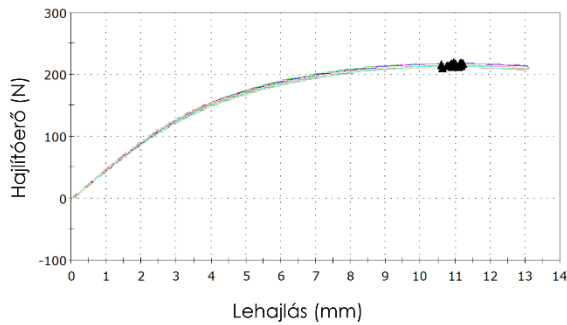
2.3. Polipropilén alapanyag

Az alapanyag kiválasztását a technikai alkalmazásokhoz való alkalmassága és kedvező gyártási tulajdonságai befolyásolták. A választott polipropilén (PP) a Tatren RM 85 82 Clear néven ismert termoplasztikus véletlenszerű kopolimer. Ez az anyag magas folyékonyságáról és kiváló feldolgozási stabilitásáról ismert. A műszaki adatlapja szerint hatékonyan feldolgozható hagyományos fröccsöntő gépeken 190 és $230\ ^\circ\text{C}$ közötti hőmérsékleten. A teszt példányokat az adatlapban megadott feldolgozási paraméterek szerint állítottuk elő.

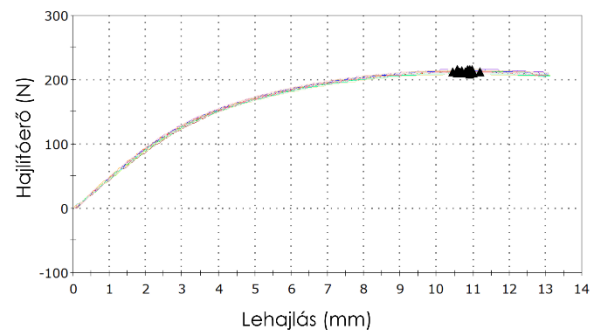
3. Eredmények és tárgyalás

A kezdeti vizsgálatok során, 1,000, 10,000 és 100,000 ciklusnál, minden teszt-példány hasonló hajlító szilárdságot mutatott, és nem voltak jelentős eltérések a teljesítményben (6. ábra). Azonban az egymillió ciklusos teszt során csak a párhuzamos mikrostruktúrával rendelkező próbatestek tudták megőrizni kezdeti hajlító szilárdsági értékeiket, míg a többi struktúrával rendelkező minták csökkenést mutattak. Ez arra utal, hogy a termék belső szerkezetének eltérő összetétele, valamint a struktúrákkal növelt inercia a párhuzamos barázdák mentén javítja a terhelés eloszlását és csökkenti a feszültségkoncentrációt hosszan tartó ciklikus terhelés során.

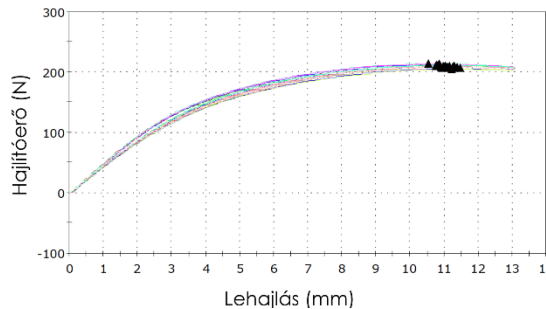
(a) 1.000 ciklus



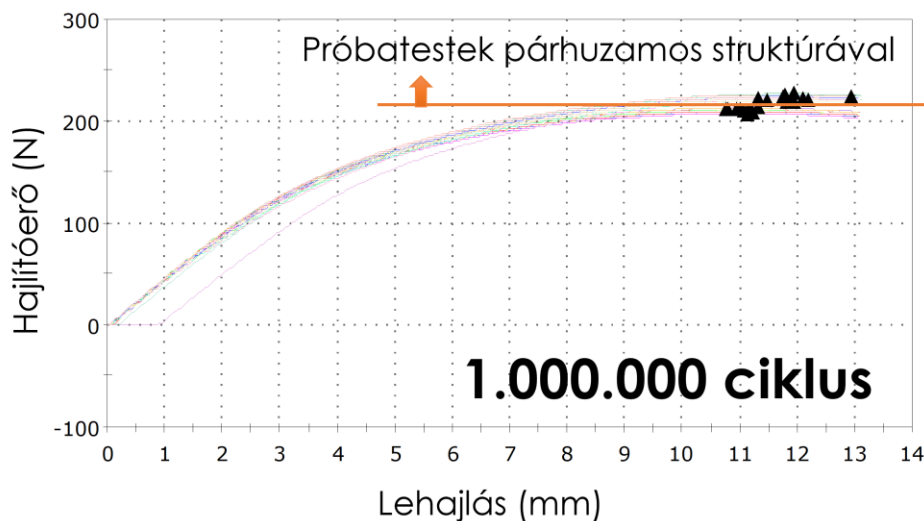
(b) 10.000 ciklus



(c) 100.000 ciklus



6. ábra. A teszt-példányok hajlító szilárdságának összehasonlítása (a) 1,000, (b) 10,000 és (c) 100,000 ciklus után



7. ábra. A párhuzamos és merőleges mikrostruktúrák hajlító szilárdságának megőrzése egymillió ciklus után

A párhuzamos struktúrák és a merőleges vagy köszörült felületek közötti mért hajlító erőkülönbség 5 és 8% között mozgott, tehát változó hajlítószilárdság megfigyelhető. Ez arra utal, hogy a párhuzamos mikrostruktúrák hatékonyabban megtartják az anyag mechanikai tulajdonságait a hosszú távú fárasztási vizsgálatok során (7. ábra). A barázda mentén hozzájárul a feszültség eloszlásának javításához és a deformációkoncentráció csökkentéséhez, ami segít megelőzni a korai szilárdságromlást a két vizsgált felületi konfigurációhoz képest.

4. Következtetések

A hidrogénalapú közlekedés megvalósítása érdekében kulcsfontosságú a IV-es típusú hidrogéntartályok fejlesztése, amelyek megbízható és hosszú távú megoldást kínálhatnak a járművek hidrogéntárolási igényeire. A tanulmányban vizsgált polimer bélés és kompozit héj integritása különösen fontos szerepet játszik a tartályok mechanikai stabilitásában és gázáteresztő képességében. A polimer anyagok kifáradási tulajdonságainak megértése és optimalizálása olyan módszerek révén, mint a mikrostruktúrák létrehozása és felületkezelési technikák alkalmazása, jelentősen javíthatja a tartályok élettartamát és teljesítményét. A fröccsöntött polimer bélések mikrostruktúráinak alakítása további lehetőséget kínál a tapadási és kifáradási ellenállás növelésére, amely az ismétlődő terheléses környezetekben kritikus fontosságú. Az ilyen fejlesztések különösen a gyors nyomásváltozások és extrém terhelések alatt nyújtanak jelentős előnyöket, melyek gyakran előfordulnak autóiipari alkalmazásokban. Összességében a tanulmány rávilágít a polimerek kifáradási jelenségeinek alaposabb vizsgálatának fontosságára, valamint a robusztus tesztlési módszerek fejlesztésének szükségességére. A jövőbeni kutatások során érdemes tovább vizsgálni a különböző polimer alapanyagok és felületmódosítási technológiák hatásait a hidrogéntároló rendszerek tartósságára és megbízhatóságára. Ezzel elősegíthetjük a zéró-emissziós közlekedési technológiák fejlődését és a hidrogénalapú járművek elterjedését, hozzájárulva a fenntartható mobilitási megoldások megvalósításához.

Köszönetnyilvánítás

A tanulmány a RRF-2.3.1-21-2022-00009, azonosítószámú, Megújuló Energiák Nemzeti Laboratórium megnevezésű projekt a Széchenyi Terv Plusz program keretében, az Európai Unió Helyreállítási és Ellenállóképességi Eszközének támogatásával valósul meg.

Irodalomjegyzék

- [1] M. M. Zefreh and A. Torok, "Theoretical Comparison of the Effects of Different Traffic Conditions on Urban Road Environmental External Costs," *Sustainability*, vol. 13, no. 6, p. 3541, Mar. 2021, doi: 10.3390/su13063541.
- [2] V. Vodovozov, Z. Raud, and E. Petlenkov, "Review of Energy Challenges and Horizons of Hydrogen City Buses," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 19, p. 6945, Sep. 2022, doi: 10.3390/en15196945.
- [3] K. Wróbel, J. Wróbel, W. Tokarz, J. Lach, K. Podsadni, and A. Czerwiński, "Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles: A Review," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 23, p. 8937, Nov. 2022, doi: 10.3390/en15238937.
- [4] L. Fan, Z. Tu, and S. H. Chan, "Recent development of hydrogen and fuel cell technologies: A review," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 8421–8446, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.egyr.2021.08.003.
- [5] Y. Manoharan *et al.*, "Hydrogen Fuel Cell Vehicles Current Status and Future Prospect," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 11, p. 2296, Jun. 2019, doi: 10.3390/app9112296.
- [6] I.-S. Sorlei *et al.*, "Fuel Cell Electric Vehicles A Brief Review of Current Topologies and Energy Management Strategies," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 1, p. 252, Jan. 2021, doi: 10.3390/en14010252.

- [7] M. Berczeli and Z. Weltsch, "Improvement of adhesive joining of hybrid aluminum – GFRP using surface modifications," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 448, p. 012050, Nov. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/448/1/012050.
- [8] Z. Weltsch, F. Tajti, and M. Berczeli, "Development of the Bonding Technology of Modern Automotive Materials with Environmentally Friendly Solutions," *Communications - Scientific letters of the University of Zilina*, vol. 26, no. 2, pp. B135–B141, Apr. 2024, doi: 10.26552/com.C.2024.026.
- [9] S. Mortazavian and A. Fatemi, "Tensile and fatigue behaviors of polymers for automotive applications," *Materwiss Werksttech*, vol. 46, no. 2, pp. 204–213, Feb. 2015, doi: 10.1002/mawe.201400376.
- [10] M. Ahmadifar, K. Benfriha, M. Shirinbayan, A. Aoussat, and J. Fitoussi, "Exploring fatigue characteristics of metallic boss-polymer liner adhesion in hydrogen storage tanks: Experimental insights post surface treatment," *J Energy Storage*, vol. 75, p. 109771, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.est.2023.109771.
- [11] D. I. Kis and E. Kókai, "A review on the factors of liner collapse in type IV hydrogen storage vessels," *Int J Hydrogen Energy*, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.09.316.
- [12] "Regulation No 134 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles and their components with regard to the safety-related performance of hydrogen-fuelled vehicles (HFCV)," 2019. doi: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/8aad3d19-7870-11e9-9f05-01aa75ed71a1/language-en>.
- [13] Y. Sun, H. Lv, W. Zhou, and C. Zhang, "Research on hydrogen permeability of polyamide 6 as the liner material for type IV hydrogen storage tank," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 46, pp. 24980–24990, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.174>.
- [14] Daniel Schultheiß, "Permeation Barrier for Lightweight Liquid Hydrogen Tanks," Universität at Augsburg, 2007.
- [15] D. Kis and K. Klam, "A kisciklusú fázisvizsgálatok alkalmazása," Kecskemét, 2021.
- [16] M. Azadi, A. Dadashi, S. Dezhianian, M. Kianifar, S. Torkaman, and M. Chiyani, "High-cycle bending fatigue properties of additive-manufactured ABS and PLA polymers fabricated by fused deposition modeling 3D-printing," *Forces in Mechanics*, vol. 3, p. 100016, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.finmec.2021.100016.
- [17] L. Safai, J. S. Cuellar, G. Smit, and A. A. Zadpoor, "A review of the fatigue behavior of 3D printed polymers," *Addit Manuf*, vol. 28, pp. 87–97, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.03.023.
- [18] R. Guo, C. Li, Y. Niu, and G. Xian, "The fatigue performances of carbon fiber reinforced polymer composites – A review," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 21, pp. 4773–4789, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.11.053.
- [19] A. Fodor and Pál Boza, "Designing Fatigue Experiment for Investigating Polymer Specimens," *MACRo*, 2015.
- [20] Kun, Krisztián, and Zoltán Weltsch. "Effect of femtosecond-laser-structured injection molding tool on mechanical properties of the manufactured product." *Polymers* 13.13 (2021): 2187. doi: 10.3390/polym13132187
- [21] Kun, Krisztián, Attila Bata, and Ferenc Ronkay. "Investigation of the Replication Quality of Microstructures on Injection Moulded Specimens Made from Recycled Polypropylene Composites Reinforced with Carbon Nanotubes." *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* 68.3 (2024): 247-253. doi: 10.3311/PPme.37288