

ADDITÍVAN GYÁRTOTT TITÁNÖTVÖZET KIFÁRADÁSÁNAK VIZSGÁLATA

FATIGUE TESTING OF ADDITIVELY MANUFACTURED TITANIUM ALLOY

Bán Krisztián ^{ORCID 0000-0001-9262-1784} ^{1*}, Hlinka József ^{ORCID 0000-0001-8737-6913} ²,
Fendrik Ármin ^{ORCID 0000-0001-6510-444X} ¹, Kovács Péter ^{ORCID 0009-0003-8547-8256} ¹

¹ Gépjárműtechnológia Tanszék, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, Magyarország
² MouldTech Systems Kft., Zalaegerszeg, Magyarország
<https://doi.org/10.47833/2024.3.ENG.003>

Kulcsszavak:

additív gyártás
Ti-6Al-4V
DMLS
fárasztó vizsgálat

Keywords:

Additive Manufacturing
Ti-6Al-4V
DMLS
Fatigue testing

Cikktörténet:

Beérkezett 2024. január 21.
Átdolgozva 2024. április 10.
Elfogadva 2024. április 20.

Összefoglalás

Napjainkban az additívan gyártott fémalkatrészek alkalmazása kiemelt jelentőségű, és a gyártásukból fakadóan kifáradási tulajdonságaik különbözhetnek a hagyományos módon gyártott alkatrészekétől. A cikkben szelektív lézeres olvasztásos eljárással (DMLS, SLM), gyári paraméterek szerint előállított Ti6Al4V minták fárasztóvizsgálatát és eredményeit mutatjuk be. Az eredmények és az S-N görbe lehetőséget adnak arra, hogy az adott gyártási paraméterekkel additív eljárással előállított Ti6Al4V-ötvözet mechanikai tulajdonságait más eljárásokkal (additív gyártás és más hagyományos eljárásokkal is) összehasonlítsuk. Képesek vagyunk megbecsülni az általunk előállított ötvözet kifáradási határértékét, és alkalmazni a mechanikai tervezésben, valamint mérésen alapuló adatokat szolgáltatathatunk a későbbi matematikai regressziós számításokhoz.

Abstract

Nowadays, the use of additively manufactured metal parts has become a high priority, and their manufacturing process can lead to different fatigue properties compared to conventionally manufactured parts. In this paper, the fatigue testing of Ti6Al4V samples manufactured by direct metal laser sintering (DMLS, SLM) with default parameter set was carried out. The results and the S-N curve provide the possibility to compare the mechanical properties of Ti6Al4V alloy produced by additive manufacturing with given manufacturing parameters with other processes (additive manufacturing and with other conventional processes). We can estimate the fatigue limit of our alloy and apply it to mechanical design, and provide measured data for subsequent mathematical regression calculations.

* Kapcsolattartó szerző.
E-mail cím: ban.krisztian@kjk.bme.hu

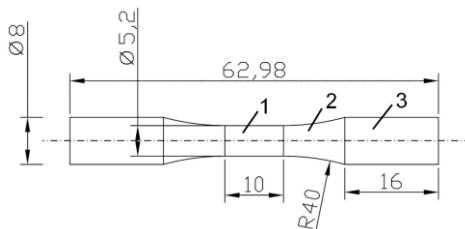
1. Bevezetés

Az additív gyártás és azon belül a szelektív lézeres olvasztásos eljárás (DMLS, SLM) a mindennapi ipari alkalmazásban egyre elterjedtebb technológia, de a legtöbb ötvözet és speciális felhasználású alapanyagból készült alkatrészek tulajdonságairól csak kevés információ áll rendelkezésünkre. Ez igaz az additív gyártású Ti6Al4V-ötvözetek esetében is. Míg az additív gyártásra szánt ötvözetek szakirodalmában és adatlapjain próbatesteken végzett vizsgálatok alapján a statikus mechanikai tulajdonságokról található információ [4, 7], addig a fárasztási vizsgálatok és azok eredményei esetében ez kevésbé jelenik meg. Kísérleti vizsgálataink első szakaszában számos, a leggyártott alkatrészek statikus, mechanikai tulajdonságaira irányuló vizsgálatot végeztünk, mivel a szakirodalomban található adatok között nagy eltéréseket tapasztaltunk [3, 5]. A fő probléma az, hogy ahány gyártó és géptípus létezik, annyi eltérés van a gyártási paraméterekben és az így kapott tulajdonságokban. Még egy gyártó berendezéseinek típusain belül is tapasztalhatók különbségek a gyártott termék tulajdonságaiban. A termék tulajdonságaira például a berendezés munkaterületének mérete is hatással van. A folyamatot befolyásoló tényezők a munkaterület hőmérsékleti viszonyai, a védőgáz és az elszívás áramlási viszonyai. Ezért az ötvözet adatlapján a tulajdonságokkal párhuzamosan a gyártó általában jelöli, hogy a vizsgálatához használt próbatesteket milyen berendezéssel gyártották. A megadott mechanikai tulajdonságok és pontosságok csak az adott gyártóberendezéssel és annak alapértelmezett paraméterkészletével történő gyártás esetén érvényesek. Ez az oka annak, hogy olyan nehéz releváns információkat találni az additívan gyártott ötvözetek területén, és ezért van nagy jelentősége a kísérleti vizsgálatoknak.

Kasperovich és Hausmann vizsgálataikban kimutatták, hogy jelentősége van a gyártott felület megmunkálásának az alkatrészek kifáradási tulajdonságaira. A "gyártás utáni állapotú" és "megmunkált állapotú" mintadarabok fárasztóvizsgálatai alapján, jó kifáradási tulajdonságok csak a "megmunkált állapotú" mintadaraboknál érhetőek el, különböző ciklikus terhelések, 200, 350, 400, 500 és 600 MPa feszültségamplitúdók alkalmazásánál. A "gyártás utáni állapotú" felületen a félig megolvadt, felülethez tapadt szemcsék szélein repedések indulhatnak el, a belső pórusokhoz hasonlóan dominálnak a kifáradási folyamatban. Az olyan alkatrészek esetében, amelyeknek nem lehet minden felületét megmunkálni, figyelembe kell venni a megmunkálatlan felületek által okozott alacsonyabb kifáradási szilárdságot [6].

2. Próbatestek és vizsgálati módszerek

A vizsgálatokhoz alkalmazott próbatesteket az ASTM International [1] szabványai szerint alakítottuk ki. Az 1. ábra a próbatestek geometriai méreteit mutatja. Az alkalmazott szabvány [1] a próbatestek geometriájára és felületi érdességére vonatkozó előírásokat tartalmaz. Az egytengelyű húzva fárasztó vizsgálat során a terhelések homogén eloszlása miatt kör keresztmetszetű mintát választottunk a vizsgálatokhoz. A henger alakú próbatest átmérőjét úgy határoztuk meg, hogy az a 25 kN-os szakítógéppel terhelhetőségén belül maradjon.

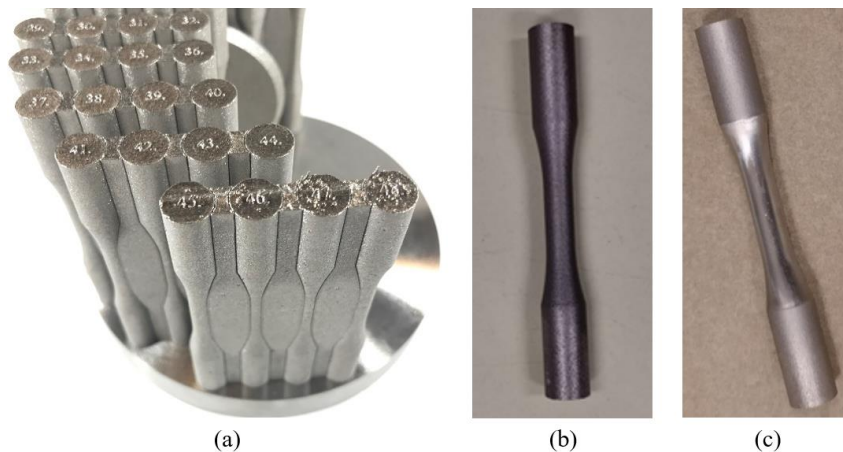


1. ábra. A fárasztó próbatestek geometriája az ASTM E466-15 szabvány szerint. A próbatest részei 1. hengeres rész, 2. átmeneti rész lekerekítéssel, 3. befogó fej.

A próbatestek egy EOS M100 típusú DMLS/SLM géppel, EOS Titanium Ti64 [2] porból készültek. A minták gyártásához a gyártó által javasolt alapértelmezett paraméterkészletet (DP) használtuk. Minden mintadarab függőleges, álló helyzetben készült, kiegészítő támasztékkal (2.(a) ábra), hogy a gyártási folyamat során megelőzzük a próbatestek torzulását. A fárasztóvizsgálat során a próbatestek Z építési irányával megegyező volt a ciklikus fárasztó terhelés. Ez az építési

orientáció eredményezi a legdurvább alkatrészfelületet és a rétegek összeolvadásánál bekövetkező legtöbb hibát.

Az alkalmazott szabványban a próbatest 10 mm hosszú hengeres vizsgálati szakaszának átlagos felületi érdességét (R_a) legfeljebb $0,2 \mu\text{m}$ -ben határozták meg. Az utolsó csiszolási lépést csak axiális irányú (a munkadarab hossz tengelyével egy irányba mutató) csiszolással lehetett elvégezni. Minden próbatestet ráhagyással készítettünk, és a végső alakot csiszolással állítottuk elő. A csiszolási folyamat előtt minden próbatest főbb geometriai méreteit lemértük. A próbatesteket hat lépésben SiC csiszolópapírral megcsiszoltuk, minden szakaszban más-más finomsággal (P120, P240, P400, P600 és P800). A próbatestek hengeres részét és a lekerítést tartalmazó nyaki részeket egyaránt csiszoltuk. A csiszolási eljárás a hossz tengelyre merőleges barázdákat eredményezett a hengeres felületen, ezért a végső lépést kézzel, tengelyirányban végeztük el egy P1000-es csiszolópapírral, hogy az összes érintőleges barázdát eltávolítsuk, amint az a 2. (c) ábrán is látható. A kézi csiszolás csak tengelyirányú barázdákat eredményezett. A minta előkészítési folyamat végén az átlagos felületi érdességét (R_a) Rodenstock RM600 lézeres felületi topográfia mérve átlagosan $R_a 0,19 \mu\text{m}$ -t, Mitutoyo SurfTest 301 tapintós érdességmérővel elvégezve a vizsgálatot átlagosan $R_a 0,11 \mu\text{m}$ -t kaptunk. Az R_a érdességvizsgálatok során egyik mérés sem mutatott ki $0,2 \mu\text{m}$ -nél durvább felületet. A próbatestek méreteit a végső csiszolás után újra megmértük, hogy a lecsiszolt réteg vastagságáról legyen információnk. A csiszolási lépések után meghatároztuk az eltávolított felületi réteg vastagságát, amely körülbelül $0,04\text{--}0,075 \text{ mm}$ volt (átmérőben mérve: $0,08\text{--}0,15 \text{ mm}$).



2. ábra. A fárasztó próbatestek az építési platformon (a), a próbatest nyers, "gyártás utáni" felülettel (b) és a próbatest a P1000-es csiszolópapírral történő csiszolás után (c).

Az előkészítés után a próbatesteket INSTRON 8872 szervohidraulikus fárasztógépben ékpályás szorítófogakkal befogtuk, és erőszabályozott, ciklikus terhelésnek vetettük alá. A vizsgálatot hat különböző feszültség szinten (90%, 50%, 25%, 15%, 12,5% és 9%) végeztük el. Minden feszültség szintnél legalább 3 kiértékelhető mérési eredményt várunk el (a kiértékelhető pontok a hengeres tartományban és az átmeneti részen eltört próbatestek voltak).

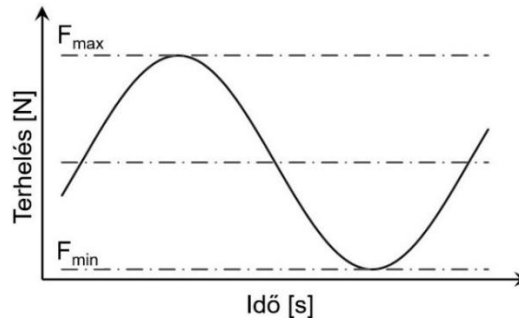
1. táblázat. Alkalmazott terhelési szintek és maximális erőértékek

$$R_p = 1\,200 \text{ MPa} \quad S_0 = 20,43 \text{ mm}^2 \quad (d_0 = 5,1 \text{ mm})$$

$$F_p = 24\,500 \text{ N}$$

Terhelési szint	F_{max} (N)
90%	22 000
50%	12 250
25%	6 125
15%	3 675
12,5%	3 000
9%	2 200

A fárasztóvizsgálat F_{\max} értékeként a korábbi szakítóvizsgálatok során meghatározott Ti6Al4V alapanyagra jellemző folyáshatár ($R_p = 1200$ MPa) értékének 90%-t, 50%-t és 25%-t választottuk, hogy adatokat kapjunk a Wöhler-görbe várhatóan legmeredekebb részéből. A Wöhler görbe nem meredek szakaszán olyan feszültségszint megtalálása volt a cél, ahol a tönkremenetelhez tartozó ciklusszám meghaladja a $2 \cdot 10^6$ ciklust. Az alkalmazott terhelési szinteket az 1. táblázat mutatja. A ciklikus terhelés F_{\min} értéke az alkalmazott F_{\max} értékének 10%-a volt (3. ábra). A ciklikus terhelés frekvenciája 10 Hz volt.



3. ábra. Periodikusan változó fárasztó igénybevétel.

Az elvégzett vizsgálat lépései:

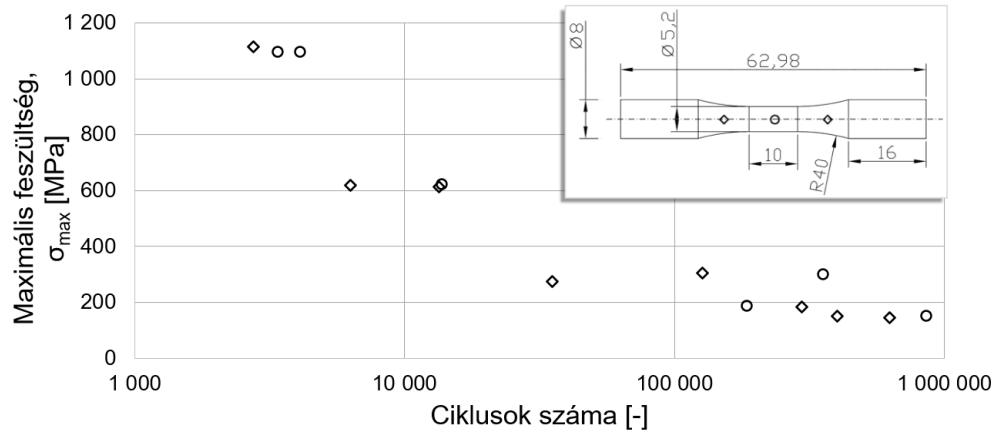
1. Próbatetek levágása a gyártási platformról,
2. Üvegszemcsés szórás a felülethez tapadt alapanyagszemcsék leválasztásához,
3. Próbatetek gyártás utáni méreteinek mérése,
4. Próbatetek hengeres részének csiszolása,
5. Próbatetek csiszolás utáni méreteinek mérése,
6. Fárasztóvizsgálat elvégzése a megadott terhelési profillal,
7. Az eredmények kiértékelése: a valós feszültség kiszámítása, a törés helyének rögzítése, a ciklusok számának meghatározása.

3. A vizsgálatok eredményei

A próbatestfelület csiszolásának szerepe a felületen lévő hibák eltávolítása, ezért az eredmények anyagtulajdonságnak tekinthetők, azzal a kikötéssel, hogy a rejtett gyártási hibák (pórusok, makrohibák, maradó feszültségek stb.) hatását is tartalmazzák. Az eltávolított felületi réteg további hatása a maradó feszültségek módosítása. A finom csiszolás ellenére a legtöbb próbatesten pórusokat találtunk. Korábbi vizsgálataink alapján a fárasztó próbatetek gyártási paraméterei esetében CT vizsgálattal igazoltuk az alapanyaggyártó katalógusban [2] megadott, a legyártott alkatrészre vonatkozó porozitási adatát, miszerint az alkatrész tömörség majdnem 100%-os, esetünkben 99,95% feletti. A gyártási eljárásból fakadó lehetséges összeolvadási pontatlanságok miatt a minták fárasztási eredményeinek nagyobb szórását várjuk az additív gyártás esetében a hagyományos gyártási technológiákhoz viszonyítva.

A próbatetek törési helye alapján kiértékeljük a mérés során alkalmazott valós feszültséget. A hengeres részen elhelyezkedő törés esetén a csiszolás után mért átmérőket használtuk. Ha a törés a minta átmeneti részében található, akkor a törés helyének keresztmetszeti átmérőjét mértük meg. Fejtörés esetén az eredményeket nem lehetett értékelni. A mérési eredmények kiértékelése után a törésig tartó ciklusok számát a valós maximális feszültség függvényében ábrázoltuk, amelyet a 4. ábra mutat.

Az általunk vizsgált összes próbatest 10^6 ciklusszámon belül eltört, így nem tudtuk elérni a $2 \cdot 10^6$ ciklust. Ez azt jelenti, hogy a kifáradási határérték nem határozható meg a kísérleti eredményekből. A regresszió alapján csak egy becslést tudunk adni. Az eredményekből az is nyilvánvaló, hogy a kifáradási határérték jelentősen alacsonyabb, mint egy hagyományosan gyártott Ti6Al4V ötvözeté. A kiértékelhető minták esetében az átmeneti részen mind az építési iránnyal szűkülő („upskin”), mind az építési iránnyal bővülő („downskin”) felületen egyaránt történt törés. A törések nagy arányú elhelyezkedése a minták átmeneti részén bizonyítja az összeolvadási hibák jelentős hatását, amely makroszinten a csiszolt felületen is látható volt.



4. ábra. Additív eljárással gyártott Ti6Al4V fárasztó próbatestek S-N görbéje, a törés helye a körrel jelölt pontok (○) esetében a próbatest középső hengeres részén, míg a rombuszsal jelölt (◇) pontok esetében az átmeneti részen történt.

A fárasztóvizsgálatok során extenzométerrel nem követtük a próbatest alakváltozásait. A vizsgáló berendezéssel erővezérelt mérést végeztünk és az alkatrész befogását tartalmazó keresztfej elmozdulásról van információ. Vizsgálatainkban a kifáradási határ meghatározása volt a cél, a szakadási nyúlás vizsgálata nem.

4. Összefoglalás

Az eredményeink alapján látható, hogy az additív eljárással előállított Ti6Al4V ötvözet a kifáradási tulajdonságok tekintetében elmarad a hagyományos eljárásokkal gyártott ötvözetekkel szemben. Hőkezeletlen állapotban a kifáradási határ feltűnően alacsony, míg a statikus mechanikai tulajdonságoknál ez a hátrány nem jelentkezik. A kifáradási határ alacsony szintje az összeolvadási hibákból és a maradó feszültség jelentős mértékéből adódik. A maradó feszültség nemcsak a hirtelen lehűlés okozta zsugorodásból származik, amelyet helyileg az olvadátkócsa közelében a hirtelen hőmérsékletcsökkenés okoz, hanem a fajlagos térfogatváltozásából is, amelyet szilárd halmazállapotban a nagy hűtési sebesség mellett lezajló első rendű fázisátalakulás okoz. Ez a fázisátalakulás a Ti-ötvözetek hűtése során következik be, de a legtöbb ausztenites acéltípusban szilárd állapotban nem létezik. Ez az oka annak, hogy miért van nagy jelentősége a feszültségoldó hőkezeléseknek az additívan előállított Ti6Al4V ötvözet esetében. Vizsgálataink folytatásaként hőkezelt minták kifáradási tulajdonságait vizsgáljuk. Célunk az additívan előállított Ti6Al4V ötvözet S-N görbéjére érvényes matematikai modell meghatározása.

Köszönetnyilvánítás

A projektet a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap (NKFIH) finanszírozta. A projekt címe: „Innovatív és újszerű megoldásokra épülő, többcélú, merevszárnyú drón és a fejlesztéséhez szükséges kompetenciák létrehozása”. A pályázat azonosítószáma: 2019-1.1.1-PIACI-KFI-2019-00139. A szerzők ezúton is köszönik a pénzügyi támogatást.

Irodalomjegyzék

- [1] ASTM E466-15: Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials, ASTM International.
- [2] EOS Titanium Ti64 Material data sheet https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/titan/ti64/eos_ti64_9011-0014_9011-0039_m290_mds_06-22_en.pdf (2022.10.29.)
- [3] Greitemeier, D.; Palm, F.; Syassen, F.; Melz, T.: Fatigue performance of additive manufactured TiAl6V4 using electron and laser beam melting, International Journal of Fatigue, Vol. 94, Part 2., 2017, pp. 211–217, ISSN 0142-1123, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.04.022>.
- [4] Hlinka, J.; Péri, B.; Fendrik, Á.; Bán, K.: Gyártási paraméterek változtatásának hatása additívan gyártott titán alkatrészek mechanikai tulajdonságaira, Gradus, Vol. 10, No. 1., 2023, ISSN 2064-8014 DOI: <https://doi.org/10.47833/2023.1.ENG.005>.

- [5] Hrabe, N.; Gnäupel-Herold, T.; Quinn, T.: Fatigue properties of a titanium alloy (Ti–6Al–4V) fabricated via electron beam melting (EBM): Effects of internal defects and residual stress, *International Journal of Fatigue*, Vol. 94, Part 2., 2017, pp. 202–210, ISSN 0142-1123, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.04.022>.
- [6] Kasperovich, G.; Hausmann, J.: Improvement of fatigue resistance and ductility of TiAl6V4 processed by selective laser melting, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 220, 2015, pp. 202-214, ISSN 0924-0136, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.01.025>.
- [7] Yuxin, H.; Yu'e, M.; Weihong, Z.; Zhenhai, W.: Effects of build direction on thermal exposure and creep performance of SLM Ti6Al4V titanium alloy, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 135, 2022, 106063, ISSN 1350-6307, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106063>.