

# Additív gyártással készített Ti6Al4V próbatestek felületi keménységének vizsgálata

## Investigation of surface hardness of Ti6Al4V workpieces manufactured by additive manufacturing

Dr. DEZSŐ Gergely<sup>1</sup>, Dr. SZIGETI Ferenc<sup>2</sup>, KÓSA Péter<sup>3</sup>

Nyíregyházi Egyetem

Nyíregyházi Egyetem Műszaki és Agrártudományi Intézet  
4400, Nyíregyháza Sóstói út 31/B, tel.: 06 42 599 462  
e-mail: dezso.gergely@nye.hu, szigeti.ferenc@nye.hu, kosa.peter@nye.hu  
www.mati.nye.hu

### Abstract

*One of most intensively developing group of additive manufacturing is composed from powder bed fusion technologies. Selective laser melting is applicable for manufacturing metallic machine parts so it attracts significant attention on fields of science and engineering. In this paper influence of processing parameters to surface hardness of test specimens manufactured from Ti6Al4V material powder by selective laser melting is investigated. Our results can be applied in production engineering in industry and design of orthopaedic implants.*

**Keywords:** surface hardness, surface hardness test on cylindrical surface, additive manufacturing, selective laser melting, Ti6Al4V

### Kivonat

*A porágyas technológiák az additív gyártási eljárások egyik legintenzívebben fejlődő, és leggyakrabban alkalmazott csoportját képezik. A szelektív lézeres olvasztás alkalmas fémalkatrészek gyártására, ezért jelenleg is jelentős tudományos és műszaki fejlesztési tevékenység kapcsolódik hozzá. A cikkben azt vizsgáljuk, hogy Ti6Al4V alapanyagból szelektív lézeres olvasztással készített próbatestek felületi keménysége hogyan változik a próbatestek SLM gyártási paramétereinek függvényében. Eredményeinket ortopédiai implantátumok gyártástervezése során szeretnénk hasznosítani.*

**Kulcsszavak:** felületi keménység, hengeres felületeken történő keménységmérés, additív gyártás, szelektív lézeres olvasztás, Ti6Al4V

## 1. BEVEZETÉS

A szelektív lézeres olvasztás (selective laser melting, SLM) az egyik legelterjedtebb módszer a fém alapanyagú alkatrészek additív gyártására [1,2]. Ezzel a módszerrel egy fémporréteget lézersugár segítségével megolvasztunk legtöbbször inert gáz atmoszférában. A Ti6Al4V széles körben alkalmazott ötvözet orvosi és ipari alkalmazásokban, akár megmunkált, akár additív módon. A Ti6Al4V fő előnye az alacsony tömegsűrűség, a nagy szilárdság, a kémiai állóképesség és a biokompatibilitás [4]. A Ti6Al4V ötvözet megmunkálhatósága függ az előállításának körülményeitől [3,5,6]. A továbbiakban ez a cikk az anyag szelektív lézeres olvasztott formájára összpontosít.

Az additív gyártás ipari alkalmazásai közül kiemelkedik az orvosi eszközök és implantátumok gyártása [7,8]. A biokompatibilis műanyagok és fémek, mint például a Ti6Al4V ötvözet különös jelentőséggel bír ezen a téren. Az elkészített alkatrészek méretpontosságát és alakhelyességét vizsgáltuk az [10] és [11] dolgozatokban.

Ebben a tanulmányban a felületi keménységre vonatkozó kísérleti eredményeket mutatunk be Ti6Al4V anyagból szelektív lézeres olvasztási technológiával gyártott alkatrészekben.

A 3D nyomtatással készített fémalkatrészek felületi keménységének vizsgálata a későbbi gyakorlati alkalmazási lehetőségek mérlegelése, számba vétele miatt indokolt. A gyakorlati alkalmazhatóság szempontjából fontos annak megismerése, hogy a nyomtatott alkatrészek felületi keménységét milyen mértékben befolyásolják a 3D nyomtatás paraméterei, ill. a felületi keménység hogyan függ a nyomtatás, ill. az egyes rétegek felépítésének irányától. Különböző mechanikai tulajdonságok várhatók a felépített és megolvastott rétegek síkjára merőlegesen és azzal párhuzamos irányban. A nyomtatott próbatestek felületi keménységét HV10 és HV30 Vickers keménységméréssel mértük, az érvényes MSZ EN ISO 6507-1 szabvány [9] szerint, akkreditált anyagvizsgáló laboratóriumban.

## 2. KÍSÉRLETI KÖRÜLMÉNYEK, VIZSGÁLATI MÓDSZER

A vizsgálatokhoz az általunk készített testmodellek és kért gyártási paraméterek alapján a Debreceni Egyetem Biomechanikai Laboratóriumában 10 mm átmérőjű és 50 mm hosszú hengeres próbatesteket készítettek. A szelektív lézeres olvasztási eljárással működő 3D nyomtató berendezés típusa: EOS-M290/400W.

A minták 2 különböző gyártási paraméter-beállításával készültek, minden beállításból 10-10 darab. Két gyártási paramétert, a) a töltő lézer teljesítményét, b) lézer sebességét változtattuk (1. táblázat). A töltő lézer teljesítménye és a lézer sebessége két fontos paraméter a szelektív lézeres olvasztásnál, melyek befolyásolják a gyártott alkatrészek szinte minden tulajdonságát. A 2. táblázat bemutatja azokat a legfontosabb paramétereket, amelyeket az egyes mintáknál állandó értéken tartottak.

A nyomtatott próbatestek alsó, felső rétegeinek, kontúr- és élterületeinek paramétereit a gyártóberendezés alapértelmezett értékeire állították be, amelyek minden minta esetében azonosak voltak.

A próbadarabok gyártási paraméterei

1. táblázat.

A paraméter beállítás kódja	A töltő lézer teljesítménye [W]	A töltő lézer sebessége [mm/s]	Teljesítménysűrűség [W/mm <sup>3</sup> ]
1 (A)	233.33	1200	46.29
2 (B)	280.00	1000	66.67

A paraméterek, melyek mindegyik próbadarabnál változatlanok maradtak

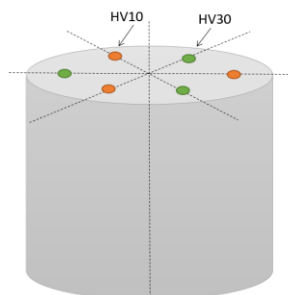
2. táblázat.

A gyártási paraméter neve	A gyártási paraméter értéke
réteg vastagság	0.03 mm
eltolási (hatch) távolság	0.14 mm

A próbadarab anyagként Ti6Al4V EOS Titanium Ti64ELI port alkalmaztunk. Anyagösszetétele 5.5-6.75 tömeg% Al, 3.5-4.5 tömeg% V, a maradék Ti, és az O, N, C, H, Fe tartalom garantáltan egy előírt határérték alatt van [4].

A nyomtatott próbatestek felülete egyenetlen, keménységmérésre alkalmatlan volt, ezért előkészítésként 0,25 mm-es érintőfogással simító esztergálást végeztünk a próbatestek homlok- és palástfelületén, amellyel a próbatestek átmérője 9,5mm-re csökkent (2.ábra).

A **felületi keménységmérést** HPO-250 típusú keménységmérő berendezésen, 2 vizsgálati terheléssel, a próbatestek **homlokfelületén (sík felületen)** a 1. ábra szerint, 3 helyen, 120°-onként végeztük, majd meghatároztuk a mérések átlagát és szórását.



1.ábra: Mérési pontok a próbatest homlokfelületén

A HV10 és HV 30 keménységértékek meghatározása az MSZ EN ISO 6507-1 szabvány szerint [9], 136°-os gyémánt gúla szűrőpróbatest alkalmazásával az alábbi összefüggés alapján történt:

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0,1891 \frac{F}{d^2}$$

ahol: d: a lenyomatátlók átlaga

F: vizsgálati terhelés (HV10-nél F=98,07N; HV30-nál F=294,21N)

A **felületi keménység mérést** (HV10) a **próbatestek palástfelületén** is elvégeztük, minden próbatestnél 3 helyen, a hengeres palástfelületen 120°-os osztásban (2.ábra). Azonban az MSZ EN ISO 6507-1 szabvány alapján a hengeres felületeken meghatározott keménységet a szabvány B5 táblázata alapján (B5.táblázat:Domború hengeres felület. Egy lenyomatátló párhuzamos a tengellyel), a táblázatban megadott korrekciós tényező fegyelembe vételével kell meghatározni. Ezért a hengeres felületen mért lenyomatátlók alapján meghatározott HV10 értéket minden mérésnél szoroztuk a 3. táblázatban szemléltetesként feltüntetett korrekciós tényezővel, amely azonban mindig aktuálisan a mért lenyomatértékek függvényében változott. A 3.pontban a hengeres felületekre közölt HV10 mérési eredmények táblázatai minden esetben a korrigált HV10 keménységértékeket tartalmazzák.

Korrekciós tényező meghatározása MSZ EN ISO 6507-1 alapján (d: a lenyomat közepes átlója; D:a próbatest átmérője)

3.táblázat

	d/D	korr. tény.
szabv.érték	0,019	0,990
Interpolációval meghatározott érték	0,020	0,9895
	0,021	0,989
	0,022	0,9885
	0,023	0,988
	0,024	0,9875
	0,025	0,987
	0,026	0,9865
	0,027	0,986
	0,028	0,9855
szabv.érték	0,029	0,985



2.ábra: HV10 mérése prizmában palástfelületen

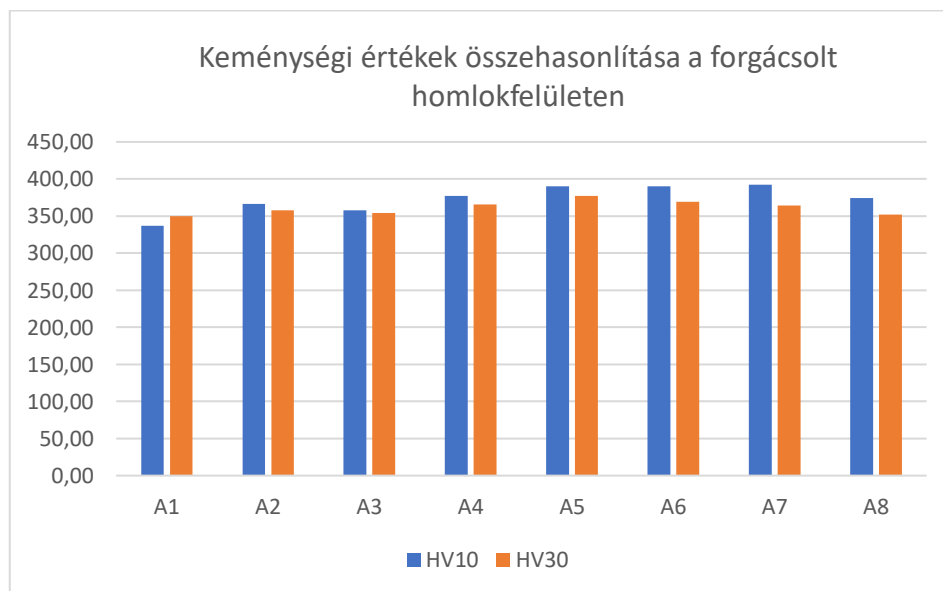
### 3. MÉRÉSI EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

#### 3.1. Homloklafületen mért HV10 és HV30 felületi keménységértékek és összehasonlításuk

A próbatestek homloklafületén mért HV10 és HV30 felületi keménységértékeket, valamint a mérési eredmények átlagát és szórását az A jelű próbatestekre vonatkozóan a 4.táblázat, a B jelű próbatestekre vonatkozóan az 5.táblázat foglalja össze. A mért HV10 és HV30 értékek összehasonlítását a 3. és 4. ábrán mutatjuk be.

„A” jelű próbatestek homloklafületén mért HV10 és HV30 felületi keménységértékek 4.táblázat

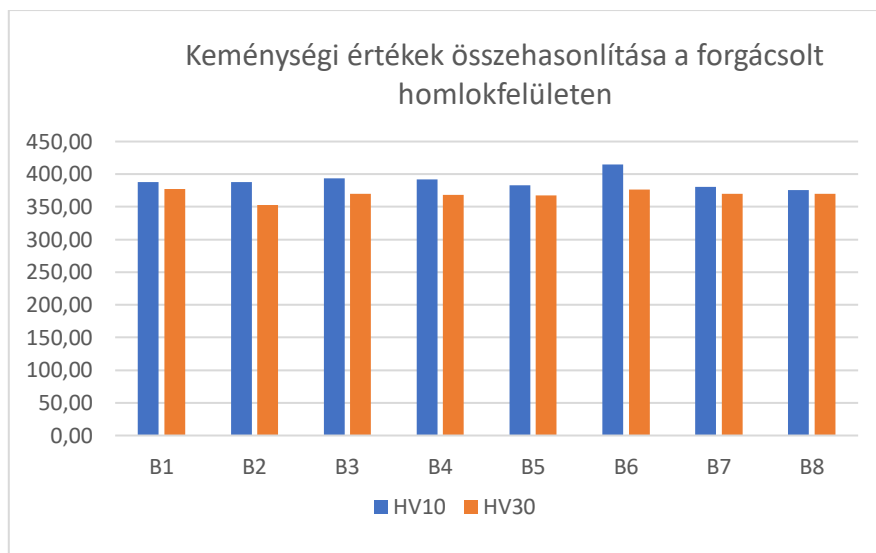
jelölés	Forgácsolt homloklafületen							sorátlag
	HV10			sorátlag	HV30			
A1	337,2	335,1	339,4	337,23	346,8	362	340,8	349,87
A2	366	360	373	366,33	355	358	360	357,67
A3	354	357	363	358,00	344	358	360	354,00
A4	369	383	380	377,33	371	366	360	365,67
A5	390	397	383	390,00	377	369	385	377,00
A6	383	409	379	390,33	371	364	373	369,33
A7	409	380	387	392,00	368	364	360	364,00
A8	383	366	373	374,00	351	348	358	352,33
Átlag	373,154				361,233			
Szórás	19,401				10,341			



3.ábra: „A”jelű próbatestek homloklafületén mért HV10 és HV30 felületi keménységértékek összehasonlítása

”

jelölés	Forgácsolt homloklapfelületen							sorátlag
	HV10			sorátlag	HV30			
B1	380	387	397	388,00	379	375	379	377,67
B2	354	397	413	388,00	351	346	362	353,00
B3	383	401	397	393,67	369	366	375	370,00
B4	409	397	369	391,67	362	371	373	368,67
B5	383	380	387	383,33	364	368	371	367,67
B6	416	405	424	415,00	377	373	379	376,33
B7	369	390	383	380,67	375	369	366	370,00
B8	401	369	357	375,67	358	373	379	370,00
Átlag	389,500				369,167			
Szórás	17,621				8,523			



4.ábra: „B”jelű próbatetek homloklapfelületén mért HV10 és HV30 felületi keménységértékek összehasonlítása

Az azonos gyártási paraméterekkel készült próbatetek HV 10 és HV30 mérési eredményeinél (mind az A-jelű, mind a B-jelű sorozatoknál) egyaránt megfigyelhető, hogy a mért keménységértékek szórása jelentős (4-5.táblázat), amely a nyomtatott rétegek inhomogenitásával, a nyomtatás, lézeres olvasztás során keletkező pórusok egyenlőtlen eloszlásával magyarázható.

Mind az A-jelű, mind a B-jelű sorozatok próbatestjein mért HV10 és HV30 keménységértékek összehasonlítása (4-5.táblázat), alapján megállapítható, hogy a mért HV30 értékek átlagosan 3-9%-al kisebbek, mint a mért HV10 értékek (mindez vizuálisan is jól látható a 3-4. ábrákon). Ennek lehetséges oka a HV30 mérésénél alkalmazott nagyobb terhelés révén keletkező nagyobb méretű és mélységű lenyomat, amely nagyobb felületen és rétegvastagságban teszi lehetővé a próbatest-felületek átlagos keménységének mérését, és amely így jobban figyelembe veszi a nyomtatott rétegek közötti pórusokat, inhomogenitást. Ez ad magyarázatot a HV30-as mért keménységértékek jóval kisebb (kb. feleakkora) szórására a HV10 mért értékek szórásához képest, mind az A-jelű, mind a B-jelű próbatetek keménységmérési eredményeinél (4-5.táblázat).

A 4-5.táblázatban feltüntetett és a 3-4. ábrákon bemutatott mérési eredmények alapján megállapítható, hogy az 1.táblázatban megadott 3D gyártási paraméterek értékei szignifikánsan befolyásolják a nyomtatott próbatetek felületi keménységét (mind a HV10, mind a HV30 keménységet). A töltő lézer teljesítményének növelése, valamint a töltő lézer sebességének a csökkentése (azaz a teljesítmény sűrűség növelése) elősegíti a

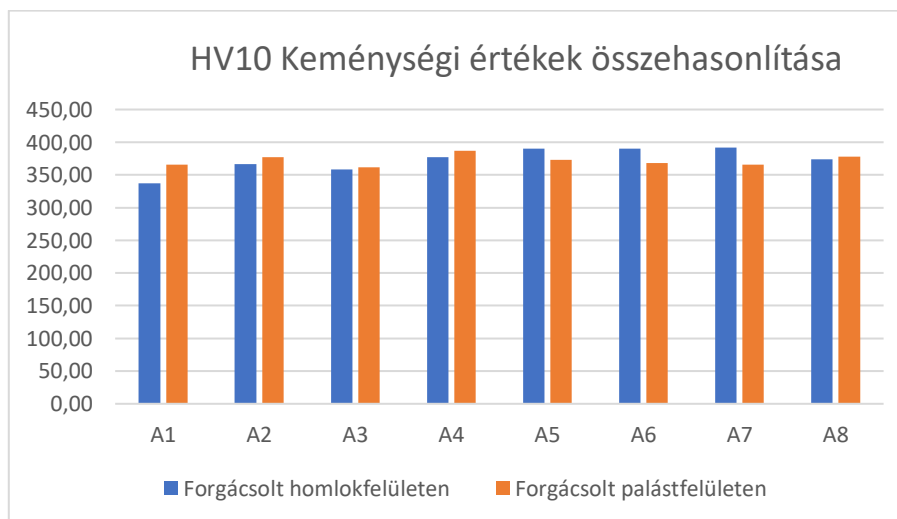
felületi réteg keménységének a növelését, mert jobb lesz a rétegek összeolvastása, kevesebb pórus marad vissza, homogénebb lesz a szerkezet, jobban egymáshoz kötődnek a lézerrel megolvastott részecskék.

### 3.2. A palástfelületen mért HV10 felületi keménységértékek és összehasonlításuk

A próbatetek hengeres palástfelületén mért HV10 felületi keménységértékeket, valamint a mérési eredmények átlagát és szórását az A jelű próbatetekre vonatkozóan a 6.táblázat, a B jelű próbatetekre vonatkozóan az 7.táblázat foglalja össze. Ezekben a táblázatokban feltüntettük a homloklfelületen mért HV10 keménység értékeket is. A palástfelületen mért HV10 értékek összehasonlítását a homloklfelületen mért HV10 értékekkel a 5. és 6. ábrán mutatjuk be.

„A” jelű próbatetek homlok- és palástfelületén mért HV10 felületi keménységértékek 6.táblázat

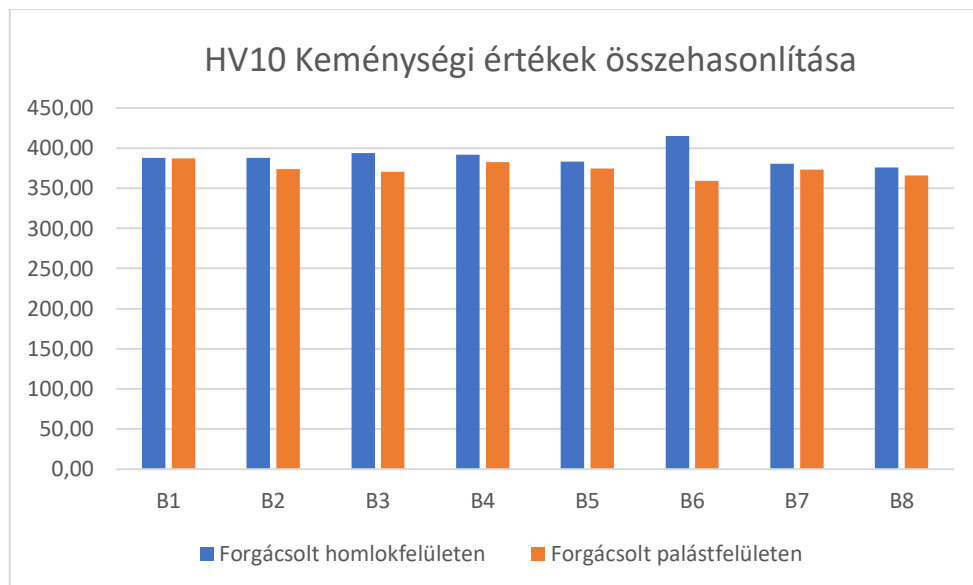
jelölés	Forgácsolt homloklfelületen				Forgácsolt palástfelületen			sorátlag
	HV10				HV10			
A1	337,2	335,1	339,4	337,23	387,5	348	360,5	365,33
A2	366	360	373	366,33	373,6	385,7	372	377,10
A3	354	357	363	358,00	362,9	363,7	358,1	361,57
A4	369	383	380	377,33	401,2	371,1	388,4	386,90
A5	390	397	383	390,00	381,4	351,1	385,7	372,73
A6	383	409	379	390,33	365,3	366,2	372,8	368,10
A7	409	380	387	392,00	356,5	378,8	361,3	365,53
A8	383	366	373	374,00	377	376,2	381,4	378,20
Átlag	373,154				371,933			
Szórás	19,401				12,796			



5.ábra: „A”jelű próbatetek homlok- és palástfelületén mért HV10 felületi keménységértékek összehasonlítása

„B” jelű próbatetek homlok- és palástfelületén mért HV10 felületi keménységértékek 7.táblázat

jelölés	Forgácsolt homlokfelületen				Forgácsolt palástfelületen			
	HV10			sorátlag	HV10			sorátlag
B1	380	387	397	388,00	359,7	398,4	404,1	387,40
B2	354	397	413	388,00	375,3	372,8	372,8	373,63
B3	383	401	397	393,67	350,3	374,5	386,6	370,47
B4	409	397	369	391,67	384,9	392	371,1	382,67
B5	383	380	387	383,33	377,9	372,8	373,6	374,77
B6	416	405	424	415,00	372,8	341,3	362,9	359,00
B7	369	390	383	380,67	383,1	372,8	364,5	373,47
B8	401	369	357	375,67	369,5	358,1	371,1	366,23
Átlag	389,500				373,454			
Szórás	17,621				13,757			



6.ábra: „B”jelű próbatetek homlok- és palástfelületén mért HV10 felületi keménységértékek összehasonlítása

Az azonos gyártási paraméterekkel készült próbatetek palástfelületén mért HV 10 mérési eredményeinél (mind az A-jelű, mind a B-jelű sorozatoknál) egyaránt megfigyelhető, hogy a mért keménységértékek szórása jelentős (6-7.táblázat), bár a szórás itt kisebb, mint a homlokfelületen mért HV10 értékek esetén.

Az „A” jelű sorozatnál a homlok- és palástfelületen mért HV10 értékek átlagértékeiben nem állapítható meg szignifikáns különbség, az A1,A2,A3,A4, A8 jelű próbateteknél a palástfelületen, az A5,A6,A7 jelűeknél a homlokfelületen mértünk nagyobb átlagos HV10 értéket (6.táblázat, 5.ábra).

A B-jelű sorozatnál azonban a palástfelületen mért HV10 keménység-átlagértékek a sorozat minden darabjánál kisebbek (a B2,B3,B6 jelűeknél jelentősen kisebb), mint a homlokfelületen mért átlagos HV10 érték, kisebb szórás mellett (7.táblázat, 6.ábra).

A homlok- és palástfelületeken mért keménység értékeket feltehetően befolyásolhatja az egyes rétegek felépítésének iránya is-egyértelmű következtetések levonásához további vizsgálatokra van szükség.

Az „A” és „B”-jelű próbatetek palástfelületén mért HV10 keménység értékek abszolút értéke és szórása nem különbözött jelentősen, a mért HV10 keménységértékek 3D gyártási paraméterektől való függése a HV10 keménység mérések eredményei alapján nem mutatható ki.

## 4. ÖSSZEGZÉS ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

Additív gyártással készített hengeres alkatrészek felületi keménységének vizsgálatát végeztük el. A próbatestek felületi keménységét HV10 és HV30 Vickers keménységméréssel mértük, az MSZ EN ISO 6507-1:2018 szabvány alapján.

A próbatesteket szelektív lézeres olvasztással (SLM) készítettük Ti6Al4V alapanyagból, eltérő gyártási paraméterekkel. Két különböző gyártási paraméter kombinációt választottunk ki a kísérletekhez, mindegyik esetben 8 darab próbatestet készítettünk és vizsgáltunk. A felületi keménység mérési eredmények elemzése alapján az alábbi főbb megállapítások fogalmazhatók meg:

- Az azonos gyártási paraméterekkel készült próbatestek HV 10 és HV30 mérési eredményeinél egyaránt megfigyelhető, hogy a mért keménységértékek szórása jelentős, amely a nyomtatott rétegek inhomogenitásával magyarázható.
- A homlokfelületeken mért HV10 és HV30 keménységértékek összehasonlítása alapján megállapítható, hogy a HV30 értékek átlagosan 3-9%-al kisebbek, mint a HV10 értékek. A HV30 nagyobb felületen és rétegvastagságban méri a felület átlagos keménységét, jobban figyelembe veszi a nyomtatott rétegek közötti pórusokat, inhomogenitást. A mért HV30-as keménységértékek szórása kb. feleakkora, mint a HV10 értékeké.
- A töltő lézer teljesítmény-sűrűségének növelése elősegíti a felületi réteg keménységének a növekedését, jobb lesz a rétegek összeolvasztása, homogénebb lesz a szerkezet.
- A homlok- és palástfelületen mért HV10 értékek átlagértékeiben nem állapítható meg szignifikáns különbség. A sík-és hengeres felületeken mért keménység értékeket feltehetően befolyásolhatja az egyes rétegek felépítésének iránya is. Erre vonatkozó egyértelmű következtetések levonásához további, nagyobb elemszámú vizsgálatra van szükség.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

„Az NKFI-125117 számú projekt a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a K\_17 pályázati program finanszírozásában valósult meg.”

A kutatás támogatást kapott az „Implantátumok osteoszintézisének kutatása és trabekuláris szerkezet kifejlesztése Additive Manufacturing alkalmazásával” című, GINOP-2.2.1-15-2017-00055 azonosító számú projektből. A próbatestek a Debreceni Egyetem Biomechanikai Laboratóriumában készültek a projekt keretében. A keménységméréseket a Nyíregyházi Egyetem Anyagvizsgáló Laboratóriumában végeztük.

A kutatómunkát a Nyíregyházi Egyetem tudományos Tanácsa támogatta.

## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Esmailian, B.; Behdad, S.; Wang, B.: The evolution and future of manufacturing: A review, *Journal of Manufacturing Systems* 39 (2016) 79–100
- [2] Thompson, M. K. et al: Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 65 (2016) 737–760
- [3] Arrazola, P.-J.; Garay, A.; Iriarte, L. M.; Armendia, M.; Marya, S.; et al: Machinability of Titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3). *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, 2009, 209 (5), pp.2223-2230. 10.1016/j.jmatprotec.2008.06.020. hal-01002827
- [4] Material data sheet of EOS Titanium Ti64ELI: <https://www.sculpteo.com/media/imagecontent/EOS-Titanium-Ti64ELI.pdf>
- [5] Maximov, J.T., Anchev, A.P., Duncheva, G.V., Ganev, N, Selimov, K.F.: Influence of the process parameters on the surface roughness, micro-hardness, and residual stresses in slide burnishing of high-strength aluminium alloys, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 39(8) (2017) pp.: 3067–3078
- [6] Revankar, G.D., Shetty, R., Rao, S.S., Gaitonde, V.N.: Wear resistance enhancement of titanium alloy (Ti-6Al-4V) by ball burnishing process, *Journal of Materials Research and Technology* 6 (1) (2017) pp.: 13-32



- [7] Dudás, I.; Cser, I.; Varga, Gy.: Modelling by rapid prototyping at the department of production engineering of UM, In: Lehoczky, László; Kalmár, László (szerk.) *microCAD 2003*, M szekció: International Scientific Conference, Miskolc, Magyarország: Miskolci Egyetem, (2003) pp. 47-52., 6 p. ISBN 963 661 646 9 o. ISBN 963 661 559 4
- [8] Dudás, I ; Varga, Gy ; Felhő, Cs.: A Rapid-prototyping eljárások orvosi alkalmazási lehetőségei In: Bitay, Enikő (szerk.) X. FMTÜ Nemzetközi Tudományos Konferencia, Kolozsvár, Románia: Erdélyi Múzeum-Egyesület (EME), (2005) pp. 279-282, 4 p.
- [9] MSZ EN ISO 6507-1: 2018: Fémek. Vickers-keménységmérés. 1. rész: Mérési eljárás
- [10]G. Dezső and P. Kósa, 'Dimensional and shape accuracy of cylindrical and paralelepiped-like parts made by selective laser melting technology', *ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering*, vol. XVIII, no. 1, pp. 39–45, 2020.
- [11]G. Dezső and P. Kósa, 'Effect of manufacturing parameters on circular runout of selective laser melted metallic parts', *Int. J. Eng.*, vol. 19, no. 3, pp. 59–63, 2021.