



A gyártási paraméterek hatása additív gyártással készített Ti6Al4V próbatetek ütőmunkájára

Effect of Production Parameters on Impact Energy of Ti-6Al-4V samples Produced by Additive Manufacturing

Dezső Gergely,¹ Szigeti Ferenc

¹ University of Nyíregyháza, Institute of Engineering and Agriculture, Department of Physics and Production Engineering, Nyíregyháza, Hungary, dezso.gergely@nye.hu

Abstract

Powder bed melting is an important additive manufacturing process. The process variants are gaining more and more space in the industry: especially in the industry that produces products made of special alloys with additive manufacturing. Selective laser melting is one variant of powder bed fusion processes. In this paper experimental study on impact energy of test specimens made from Ti-6Al-4V alloy, manufactured by selective laser melting is presented. Parameter setup of experiments are defined by design of experiment method, and an empirical formula is fitted to measured data. It is pointed out that impact energy is highly sensitive to manufacturing parameters studied here, and strong interactions are also observed. A formula is derived for constrained optimization on isoenergetic surfaces. Results can be applied for control of an important material property, impact strength of parts manufactured by selective laser melting.

Keywords: *powder bed fusion, selective laser melting, impact energy, scan speed, layer thickness.*

Összefoglalás

A porágyolvasztás az additív gyártási eljárások egyik fontos típusa. A különféle eljárásváltozatai egyre nagyobb teret nyernek az iparban, főleg a különleges ötvözetekből készülő gyártmányokat additív gyártással előállító iparágban. A porágyolvasztás egyik változata a szelektív lézeres olvasztás. Ebben a tanulmányban Ti-6Al-4V alapanyagból szelektív lézeres olvasztással készített próbatetek ütőmunkájára vonatkozó kísérletek eredményeit mutatjuk be. A kísérleti paramétereket a kísérlettervezés módszerével határoztuk meg. A mérési adatokra empirikus formulát illesztettünk. Kimutattuk, hogy az ütőmunka igen érzékeny az általunk változtatott gyártási paraméterekre, valamint erős kölcsönhatások is megfigyelhetők. Olyan összefüggést származtattunk, amelynek segítségével lehetőség nyílik az ütőmunkának izoenergetikus felületek mentén történő optimalizálására. Eredményeink felhasználhatók egy fontos anyagtulajdonság, az ütőmunka beállítása a szelektív lézeres olvasztással történő gyártás során.

Kulcsszavak: *porágyolvasztás, szelektív lézeres olvasztás, ütőmunka, letapogatási sebesség, rétegvastagság.*

1. Bevezetés

A 20. század közepén megindult, robbanásszerű tudományos fejlődés eredményeképpen az additív gyártás alkalmazása egyre inkább terjed az iparban.

Sokféle szerepet tölthet be a tervezési, gyártási és karbantartási folyamatban, ideértve a proto-

típus-készítést, az öntési minták és a magok készítését, a szerszámok, fúrók vagy szerelvények (különösen összetett forma esetén) gyártását, a nyersdarabok gyártását, a végfelhasználású alkatrészek gyártását, az alkatrészek javítását. Figyelemre méltó, hogy a porágyolvasztás különféle változatai ma már a fentebb említettek közül

az első öt terület mindegyikén alkalmazhatók. Az előrejelzések szerint 2050-ig az utastér berendezésének és a gépkatrészek háromnegyede, valamint a hajtóművek alkatrészeinek fele várhatóan additív gyártással készül majd a repülőgépiparban [1]. Az additív gyártás alkalmazása az egészségügyben öt területre osztható: orvosi modellek, sebészeti implantátumok, sebészeti segédeszközök, külső támaszok és biológiai anyagok előállítása. Az additív gyártás orvosi alkalmazásairól szóló tudományos publikációk száma exponenciális növekedést mutat az elmúlt 15 évben [2, 3]. Az additív gyártási eljárásokat manapság főleg az ipar nagy hozzáadott értékű szegmenseiben alkalmazzák viszonylag kis, de növekvő mennyiségben. Az additív gyártás ma is a kutatás, az ipari tevékenység és az üzleti élet intenzív területe. Míg ez idáig több száz eljárásváltozatot fejlesztettek ki, amelyek a szakértők kreativitását és a terület ígéretes fejlesztési potenciálját jelzik, néhány kihívást meg kell oldani, mielőtt az additív gyártás széles körben elterjed, és költséghatékony gyártástechnológiává válna. Fejlesztés több tudományterületen szükséges a technológia jobb hasznosításához. Ilyen tudományterületek az oktatás és tudásmenedzsment, a tervezést támogató szoftverek, a munkatérmetet és a gyártási sebesség korlátainak leküzdése, új ötletek és eljárások a minőségirányításban, mivel a termékek jellemzői nagymértékben függenek a gyártási paramétereiktől és azok értékének véletlenszerű ingadozásaitól [4].

Az additív gyártású termékek minőségirányítása a kutatás-fejlesztés intenzív területe. Míg az additív gyártásnak általában megvan az a nagy előnye, hogy közvetlenül CAD-modellekből állít elő szinte tetszőlegesen bonyolult geometriájú termékeket, addig a minőség és a folyamatok megismételhetősége terén vannak kihívások [5, 6].

Ebben a cikkben egy kísérleti kutatást mutatunk be szelektív lézeres olvasztással (SLM) gyártott alkatrészekben. Ez egy porágyolvasztási eljárásváltozat, amely rendkívül intenzív lézersugárzást alkalmaz arra, hogy a fémport rétegről rétegre teljesen megolvassa a szükséges helyeken.

A fémek közül elsősorban a rozsdamentes acélok és a titánöt-vözeteket használják szelektív lézeres olvasztással történő gyártáshoz. A titánöt-vözetek iránti érdeklődés 2010 körül meredeken megnőtt, amikor bebizonyosodott, hogy biokompatibilisek. Egyre nagyobb érdeklődést kapnak továbbá a kerámiák és a kompozit anyagok [7].

A Ti6Al4V az egyik leggyakrabban használt titánöt-vözet az iparban. Ez olyan kiváló tulajdon-

ságaiból következik, mint a jó fajlagos szilárdság, a nagyfokú korrózióállóság, hogy nem mágnesezhető, és a biokompatibilitás. Ezt az anyagot gyakran alkalmazzák a járműiparban, különösen a repülőgép-alkatrészek gyártásában, a tengeri alkalmazásokban, az orvosi implantátumok készítésében, az atomreaktor-technológiában és sok más területen. Ez az anyag előgyártmány formájában kapható a hagyományos gyártási eljárásokhoz, valamint fémpor formájában az additív gyártáshoz. Ebben a tanulmányban a Ti-6Al-4V por alapanyagból additív gyártással készült próbatestekkel foglalkozunk.

Az SLM egy széles körben alkalmazott gyártási mód a Ti-6Al-4V porok feldolgozására. Az ezen alapuló technológiát alkalmazzák a legelterjedtebben, elsősorban a repüléstechnikai és az orvostechnikai ipar területén, és sokoldalúsága miatt kiemelt figyelmet kap a kutatásban is. Az SLM-mel való gyártás számos előnye mellett három kihívással kell szembenézni Ti-6Al-4V alapanyag esetén. Az első az, hogy a nagy anyag-szilárdság mellett a gyártott alkatrészeknek viszonylag kicsi az alakíthatósága. Ez korrelál a nagy hűlési sebességgel az SLM-folyamat során, ami martenzites anyagszerkezetet eredményez. A második kihívás a mikroszerkezeti hibák, például a csomók és a porozitás jelenléte, ami nagymértékben befolyásolja az alkatrészek kifáradással szembeni ellenállását. A harmadik kihívás a gyártási folyamat során fellépő, gyors hőmérséklet-változásból és nagy -gradiensből eredő maradó feszültségek jelenléte az elkészített alkatrészekben. A felsorolt kihívások mindegyike nagyszámú paramétertől függ, hiszen a teljes SLM-es gyártási folyamat akár száznál is több műszaki adattal jellemezhető. Az SLM-mel készített alkatrészek anyagtulajdonosságainak alakulásában azonban három paraméter játszik különösen fontos szerepet: a lézerteljesítmény, a lézernyaláb letapogatási sebessége és a megolvasztott por rétegvastagsága. Mivel a fentebb említett három probléma jelentősen befolyásolja az alkatrészek gyakorlati és ipari felhasználását, napjainkban kiterjedt kutatás folyik ezen a területen [8, 9]. Általában utómegmunkálás is szükséges a megfelelő minőség eléréséhez. Orvosi alkalmazásokhoz különböző utómegmunkálások alkalmazhatók, például szemcseszórás, polírozás vagy ultrahangos kezelés izopropil-alkoholban [10, 11].

Az SLM-mel gyártott anyagok tulajdonságai nem egyetlen folyamatparamétertől függenek közvetlenül, hanem ezek kombinációjától. Amikor azt

kívánjuk tanulmányozni, hogy az anyagtulajdon-ságok hogyan függenek a gyártási paramétereiktől, akkor többparaméteres vizsgálatra van szükség.

Az ütőmunka olyan anyagtulajdon-ság, amely szoros kapcsolatban áll a hajlékonysággal, illetve a törékenységgel. Ebben a cikkben a Ti-6Al-4V próbatestek ütőmunkájával kapcsolatos kísérleti kutatási eredményeinket mutatjuk be a lézerteljesítmény, a lézer letapogatási sebessége és a rétegvastagság függvényében.

2. Az alapanyag és a próbatestek

2.1. Alapanyag

Kísérleteink során a próbatesteket Ti-6Al-4V (TC4, Ti64) ötvözetből készítettük EOS Titanium Ti64ELI por szelektív lézeres olvasztásával. Ennek a pornak a kémiai összetétele 5,5–6,75% Al, 3,5–4,5% V, a fennmaradó rész titánból áll, és bizonyos elemek, mint az O, N, C, H, Fe tömegszázalékos aránya garantáltan egy bizonyos alacsony szint alatt marad. Ezt a titánötvözetet csökkentett oxigén-, nitrogén-, szén- és vastartalom, extra kis intersticiós tartalom (ELI) jellemzi, ami nagyobb rugalmasságot és a kifáradással szemben fokozott ellenálló képességet biztosít. Ezért alkalmas orvosi implantátumok és eszközök készítésére. A fémpor szemcsemérete 20–80 mikrométer között változik az adatlap szerint [12].

2.2. A próbatestek

A próbatesteket EOS M290/400W berendezéssel állítottuk elő, amely fémporok szelektív lézeres olvasztását valósítja meg. A szelektív lézeres olvasztás rétegről rétegre történő gyártási folyamat, melynek két kulcslépése van: egy lemezen vagy tálcán fémporréteget alakítanak ki, majd lézernyalábbal szelektíven olvasztják a fémport a készülő alkatrészhez tartozó területeken. Ez zárt kamrában történik, amely semleges gázzal van feltöltve. Ennek a folyamatnak a fő paraméterei a rétegvastagság, a lézernyaláb oldalirányú eltolási távolsága, a lézerteljesítmény és a lézer (pásztázási) sebessége, de számos más adat beállítása is

1. táblázat. A szelektív lézeres olvasztás négy legfontosabb paraméterének neve, jele, alapértelmezett értéke az általunk használt berendezés esetén

A paraméter neve	Jelölés	Alapértelmezett érték
Lézerteljesítmény	P	280 W
Pásztázási sebesség	u	1200 mm/s
Rétegvastagság	t	0,03 mm

szükséges, például a gázáramlás, a lézernyaláb, a réteg pásztázási mintázatának, az aktuátorok mozgásának, a kamra termikus állapotának szabályozására. A paraméterek annak függvényében is változnak, hogy a modell melyik régiója készül éppen, azaz a belső (kitöltés), az alsó, a felső rész vagy annak valamelyik széle. A gép kezelőszoftvere alapértelmezett paraméterbeállítást kínál, amelyet a felhasználó módosíthat.

A minták alakja megegyezett egy szabványos, 10×10×55 mm-es Charpy-ütőpróbatestével (szabvány: MSZ EN ISO 148-1:2017).

Minden próbatestet ugyanabban az orientációban gyártottunk. Ennek kiemelt jelentősége van olyan gyártástechnológiák esetében, amelyek a mikroszerkezetben és akár az előállított alkatrész tulajdonságaiban anizotrópiát eredményeznek. Előzetes vizsgálatot végeztünk 5-5 próbadarabbal az ütőmunkára. Megállapítottuk, hogy az álló és a fektetett minták átlagértékei között 19,57%-os különbség volt. Ahogy az várható volt, a kisebb ütőmunkaérték az álló helyzethez tartozik, mert ebben az esetben a törés egymásra olvadt rétegek mentén történik. A fektetett helyzetben gyártott próbadaraboknál, amikor a bevágás a felső oldalon van, a minta törésekor a rétegeknek szét kell szakadniuk.

Tanulmányunkban a gyártási paraméterek ütőmunkára gyakorolt hatását vizsgáljuk. Mivel nagyszámú gyártási paraméter létezik, ezek közül három nagyon fontosat választottunk ki: a lézerteljesítményt (P), a pásztázási sebességet (u) és a rétegvastagságot (t). Ezek főbb alapértelmezett értékeit az **1. táblázat** foglalja össze.

Kísérlettervünkben minden paraméter háromszintű volt. A szintek nem egyenlő távolságra vannak, hanem egymásnak 1,2-szeresei. A **2. táblázat** a gyártási paraméterek értékeit mutatja a kísérletekben.

Az energiabevitel (e , W/mm³) a szelektív lézeres olvasztás jellemző tulajdonsága. Amint a mértékegységből is látható, ez a mennyiség valójában a fajlagos bemeneti teljesítmény, vagyis a teljesítménysűrűség: az 1 másodperc alatt 1 mm³ térfogatú fémporba besugárzott energia. A gyártási paraméterekből a következő képlettel számítható ki:

2. táblázat. A kísérletekben alkalmazott faktorok szintjei

Faktor	-1. szint	0. szint	1. szint
P (W)	233,33	280	336
u (mm/s)	1000	1200	1444
t (mm)	0,025	0,030	0,036

$$e = \frac{P}{u \cdot 1s \cdot t \cdot h} \quad (1)$$

Itt mutatkozik meg az arányosan kiválasztott szintek haszna, mivel így sok különböző paraméterkészletünk van azonos energiabevitelrel (e), ahogy a **2.** és **3. táblázat** mutatja. Így további lehetőség nyílik a kísérleti adatok kiértékelésére, figyelembe véve az energiabevitelt jellemző mennyiséget. Egy teljes faktoriális kísérlet $3^3 = 27$ különböző paraméterbeállításból állna. Ez nagy szám, ezért úgy döntöttünk, hogy egy ortogonális, részleges faktorális kísérletet tervezünk 9 kísérleti beállítással a **3. táblázat** szerint. Ez a részleges faktorális kísérletterv Taguchi $L_9(3^4)$ ortogonális tervtömbjéből származik a negyedik oszlop törlésével [13].

Az eredmények összehasonlítására és ellenőrzésére próbatesteket készítettünk további három paraméterkészlettel, beleértve az alapértelmezett paraméterbeállítást (J), a **4. táblázat** szerint. Minden paraméterbeállításához öt próbatestet állítottunk elő.

3. táblázat. A részleges faktoriális kísérletterv paramétereit és az azokhoz tartozó teljesítménysűrűség-értékek

	Lézer-teljesítmény (W)	Lézer-pásztázási sebesség (mm/s)	Rétegvastagság (mm)	Energiabevitel (W/mm^3)
A	233,33	1200	0,03	46,296
B	280	1000	0,03	66,667
C	336	1440	0,03	55,556
D	336	1200	0,025	80,000
E	233,33	1000	0,025	66,667
F	280	1440	0,025	55,556
G	280	1200	0,036	46,296
H	336	1000	0,036	66,667
I	233,33	1440	0,036	32,150

4. táblázat. A három összehasonlító próbatest gyártási paramétereit

	Lézer-teljesítmény (W)	Lézer-pásztázási sebesség (mm/s)	Rétegvastagság (mm)	Energiabevitel (W/mm^3)
J	280	1200	0,03	55,556
K	233,33	1000	0,03	55,555
L	280	1000	0,025	80,000

3. Eredmények és kiértékelés

3.1. A kísérleti eredmények

A Charpy-féle ütőpróbát az MSZ EN ISO 148-1:2017 szabvány szerint végeztük. Charpy PSW 15 típusú ütőművet alkalmaztunk, amelynek maximális ütési energiája 15 J és skálaállandója 0,1 J. Egyetlen kivétel van, az A-val jelölt mintasorozat, mivel ezek ütközési energiája meghaladta a 15 J-t. Emiatt ebben az esetben egy nagyobb, PSW 30-as tesztberendezést kellett alkalmaznunk.

Az ütőmunkát K betűvel jelöljük. Az ütőmunka mértékegysége ebben a cikkben Joule (J). A mérési eredményeket az **5. táblázat** mutatja.

Minden kísérlet 5 mérésből állt. Ez azt jelenti, hogy öt, azonos paraméterbeállítással gyártott próbatestet törtünk el. Ezután kiszámítottuk az ütőmunka középértékét és szórását. Kísérleteink a korrigált tapasztalati szórás értékeit tartalmazzák.

3.2. A mérési eredmények értékelése

Az ütőmunkát a kísérlet faktorainak függvényeként írjuk le:

$$K = K(P, u, t). \quad (2)$$

5. táblázat. A mérési eredmények bemutatása.

Az oszlopokban a próbatestek kódjai (1. oszlop), a mérési eredmények J egységben (2–6. oszlop), az átlag és a szórás (7–8. oszlopok) látható

Minta azonosító	1	2	3	4	5	Átlag	Korrigált tapasztalati szórás
A	18,0	18,0	16,0	16,0	16,0	16,8	1,10
B	15,0	13,7	14,6	11,9	13,9	13,8	1,19
C	10,2	10,3	10,7	10,2	11,4	10,6	0,51
D	8,4	8,2	10,1	8,9	8,3	8,8	0,79
E	11,0	9,8	8,6	9,5	10,2	9,8	0,88
F	12,7	10,0	11,3	10,8	11,6	11,3	1,00
G	12,8	14,2	12,6	13,0	14,3	13,4	0,81
H	11,3	11,7	11,3	11,1	10,6	11,2	0,40
I	11,3	10,2	10,2	11,7	12,2	11,1	0,90
J	11,4	9,6	10,4	12,1	11,7	11,0	1,02
K	11,2	10,3	10,6	11,3	9,8	10,6	0,63
L	10,3	9,1	9,0	8,6	8,9	9,2	0,65

Elsődleges célunk az volt, hogy empirikus képletet találjunk ehhez a függvényhez. Esetünkben az interpolációs technika megfelelő, mert olyan képletet keresünk, amely megfelelően közelíti a mért ütmunkaértékeket a kísérleti paraméter-tartományon belül. Az általunk vizsgált jelenség természetéből adódóan célszerű polinomokat használni az illesztéshez. A polinom fokszámát úgy kell meghatározni, hogy elkerüljük a túlillesztést. Most 12 mért adatunk van, ami azt jelenti, hogy a harmadfokú közelítés túl magas. Következésképpen egy másodrendű polinommal közelítjük a függvényt:

$$K(P, u, t) = a_0 + a_1P + a_2u + a_3t + a_4P^2 + a_5u^2 + a_6t^2 + a_7Pu + a_8Pt + a_9ut \quad (3)$$

Az $a_0 \dots a_9$ szorzótényezők mértékegységei úgy adódnak, hogy a formula kiszámítása után az eredmény mértékegysége J (joule) legyen. Például $[a_0] = J$, $[a_1] = \frac{J}{W} = s$ és így tovább. A cikk

hátralevő részében ezeket a mértékegységeket nem tüntetjük fel a jobb olvashatóság érdekében.

A K függvényben szereplő $a_0 \dots a_9$ ismeretlen szorzótényezőket kiszámítására a Scilab szoftvert használtuk. A legkisebb négyzetek módszerét alkalmaztuk a K függvény közelítésére. A Scilab programrendszerben az OPTIM függvény segítségével végezhető el a nemlineáris illesztés. Ehhez szükség van a közelítő függvény alakjának és gradiensének megadására és az eljárás lefutását szabályozó néhány változó értékének beállítására. A feladat, amit megoldunk, egy általános, nemlineáris optimalizálási feladat egyetlen, sima célfüggvénnyel, megszorítások nélkül. Az OPTIM algoritmus az L-BFGS módszert használja az optimalizálásra [14].

A nemlineáris optimalizálási algoritmus lefuttatásával az alábbi empirikus függvényt kaptuk a K ütmunkára:

$$K(P, u, t) = -70,745933 - 0,0008086 P + 0,1064481 u + 1329,3723 t - 0,0001446 P^2 - 0,0000315 u^2 - 93,507847 t^2 + 0,0000201 Pu + 0,908954 Pt - 1,1531936 ut \quad (4)$$

A szorzótényezők értékei ebben a képletben azt mutatják, hogy egy bizonyos tényező (P , u , t) és a tényezők kölcsönhatásai (Pu , Pt , ut) milyen erősen befolyásolják az ütmunkát (K). Minél nagyobb a szorzó, annál érzékenyebb az ütmunka a szorzótényezőre vagy kölcsönhatásra.

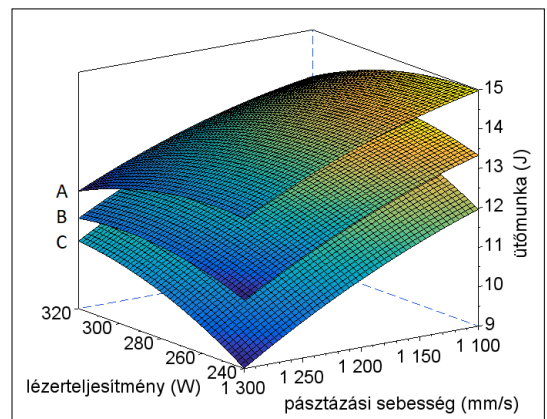
Így kaphatunk egy „iránytűt” az SLM-gépünkben olvasztott anyag ütőmunkájának szabályozására. A (4) képlettel definiált empirikus, háromváltozós függvényt az 1. ábra szemlélteti.

A függvény értelmezését megnehezíti az, hogy a P , u és t faktorok számai között nagyságrendi eltérés van. A pásztázási sebesség mm/s egységben 5 nagyságrenddel nagyobb, mint a mm-ben mért rétegvastagság. Ez azt jelenti, hogy u kis változása nagy változást eredményez K -ban, de t kis változása sokkal kisebb hatást eredményez, ha ugyanaz a szorzótényező. Más szóval a szorzótényezők nem összehasonlíthatók, ha a mellettük álló mennyiségek nem azonos nagyságrendben vannak.

A dimenziótlantítás a fizikai mennyiségek olyan formába való átalakításának szokásos módja, amelyben azok jobban összehasonlíthatók. A P , u és t tényezőket érdemes dimenzió nélküli változóval helyettesíteni, és egyben átskálázni a multiplikatív paramétereket. Vezessük be a következő, dimenzió nélküli változókat:

$$x_p = \frac{P}{280 \text{ W}}, x_u = \frac{u}{1200 \text{ m/s}}, x_t = \frac{t}{0.03 \text{ mm}} \quad (5)$$

Azt mondhatjuk, hogy az eredeti faktorokat az alapértelmezett értékükre normalizáljuk. A dimenziótlantított változók értéke éppen 1, ha az eredeti változók az alapértelmezett értéket veszik fel. Például $x_p = 1$, ha $P = 280 \text{ W}$, és $x_p = 1,2$, ha $P = 336 \text{ W}$. Ez azt jelenti, hogy a kísérleteinkben beállított gyártásparaméter-értékek mindegyike megfelel a 0,8, 1 vagy 1,2 dimenziótlantított értékek valamelyikének. Az $a_0 \dots a_9$ szorzótényezőket is skálázzuk a következőképpen:



1. ábra. A (4) empirikus formula grafikonja. A három felület a három különböző rétegvastagság-értékhez tartozik. A: $t = 0,036 \text{ mm}$, B: $t = 0,030 \text{ mm}$, C: $t = 0,025 \text{ mm}$

$$\begin{aligned}
 b_0 &= a_0, b_1 = a_1 \cdot 280 \text{ W}, b_2 = a_2 \cdot 1200 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \\
 b_3 &= a_3 \cdot 0,03 \text{ mm}, \quad b_4 = a_4 \cdot (280 \text{ W})^2, \\
 &\dots \\
 b_7 &= a_7 \cdot 280 \text{ W} \cdot 0,03 \text{ mm} \\
 b_8 &= a_8 \cdot 1200 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,03 \text{ mm}.
 \end{aligned} \quad (6)$$

Minden új $b_0 \dots b_9$ szorzótényezőnek azonos a mértékegysége, ami megegyezik a K függvény mértékegységével, ami nem más, mint a joule. A dimenziótlanítás elvégzésével a következő formulát kapjuk:

$$\begin{aligned}
 K(P, u, t) &= -70,745933 - 0,226397 x_p \\
 &+ 127,73777 x_u + 39,881168 x_t \\
 &- 11,340299 x_p^2 - 45,311942 x_u^2 \\
 &- 0,0841571 x_t^2 + 6,7491589 x_p x_u \\
 &+ 7,6352133 x_p x_t - 41,51497 x_u x_t
 \end{aligned} \quad (7)$$

A (7) képletben az együtthatók összehasonlíthatók. Az elsőrendű tagokban a pásztázási sebesség és a rétegvastagság együtthatói 100-szor nagyobbak, mint a lézerteljesítményé. A tisztán másodrendű tagok rétegvastagsága két nagyságrenddel kisebb súlyú, mint a másik kettőnél. A kölcsönhatási tagok közül az $x_u x_t$ a legnagyobb együtthatójú, ugyanakkor $x_p x_u$ és $x_p x_t$ is jelentős súllyal szerepel. Ebből az áttekintésből arra következtethetünk, hogy a P , u és t gyártási paraméterek mindegyike hatással van az energiára, egyik sem elhanyagolható, de eltérő matematikai kapcsolatban állnak vele.

3.3. Az ütőmunka optimalizálása az izoenergetikus felületek mentén

Az energiabevitel, más szóval a teljesítménysűrűség, a szelektív lézeres olvasztás (SLM) fontos jellemzője. Számos jelenség erősen függ tőle, mint például a gyártási folyamat során fellépő hőmérséklet-változások, termikus feszültségek és deformációk, valamint néhány kísérőjelenség, mint a gömb alakú cseppek képződése és a fröccsenés. Azonban nem egyértelmű, hogy van-e közvetlen kapcsolat az energiabevitel és egy jelenség vagy jellemző között. Az SLM-alapú technológia optimalizálásakor sokszor több feltételnek kell teljesülnie. Ilyen helyzetben kényszerű feladat adódhat: a gyártási paramétert úgy módosítani, hogy az energiabevitel állandó maradjon, hogy megváltozzon a gyártott alkatrész anyagának egy speciális tulajdonsága, mint például az ütőmunka.

Kísérleti paraméterbeállításunkat úgy alakítottuk ki, hogy ezek közül sok azonos teljesítménysűrűségi (energiabevitel, e) értékkel szerepeljen. Ezt

arra használjuk, hogy megvizsgáljuk, hogyan függ az ütőmunka a lézernyaláb teljesítménysűrűségétől a gyártási folyamat során. A **3. és 4. táblázat** alapján azonosíthatjuk, hogy mely kísérleti összeállítások energiabevitele azonos. Ezt a **6. táblázat** foglalja össze.

A három különböző gyártási paraméter (lézerteljesítmény, pásztázási sebesség és rétegvastagság) terében az (1) képlet minden energiaértékhez meghatároz egy felületet. Az ilyen felületeket izoenergetikus felületeknek nevezzük. Ezeknek a felületeknek az egyenlete átrendezéssel származtatható:

$$t = \frac{P}{u \cdot 1s \cdot e \cdot h} \quad (8)$$

A **2. ábra** azokat az izoenergetikus felületeket mutatja, amelyek a **6. táblázat** első oszlopában találhatóak. Minden kísérleti beállítás egy pontnak felel meg valamely felületen.

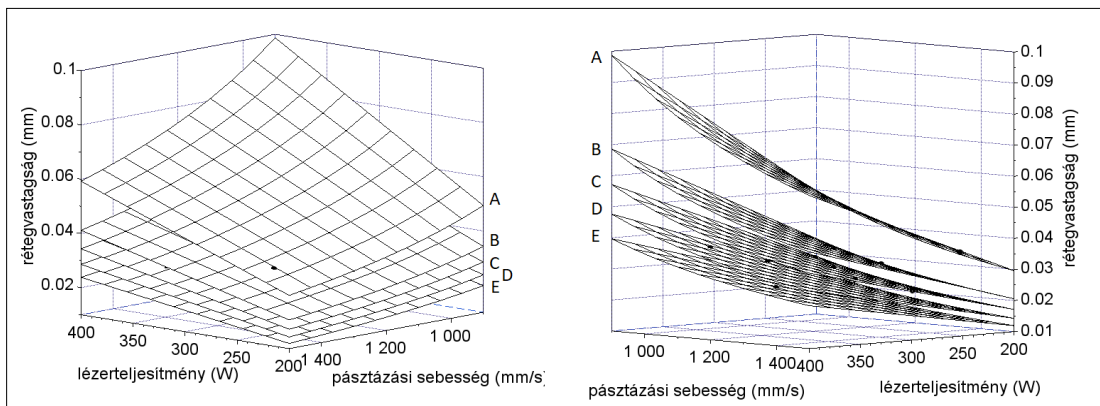
A (4) és (6) egyenletekből levezetjük az izoenergetikus felület mentén az ütközési energiára vonatkozó képletet. A rétegvastagságot (t) kiküszöböljük a (4)-ből a (6) behelyettesítésével:

$$\begin{aligned}
 K(P, u, e = \text{constant}) &= -70,745933 - 0,0008086 P \\
 &+ 0,1064481 u + 1329,3723 \frac{P}{u \cdot 1s \cdot e \cdot h} \\
 &- 0,0001446 P^2 - 0,0000315 u^2 \\
 &- 93,507847 \left(\frac{P}{u \cdot 1s \cdot e \cdot h} \right)^2 + 0,0000201 P u \\
 &+ 0,908954 \frac{P}{u \cdot 1s \cdot e \cdot h} \\
 &- 1,1531936 \frac{P}{1s \cdot e \cdot h}
 \end{aligned} \quad (9)$$

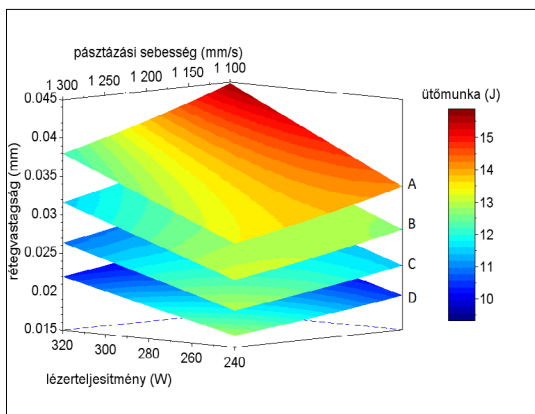
Mint korábban említettük, a vizsgálatunkban a nyalábeltolási távolság (h) is állandó. Ez a lézerteljesítmény (P) és a pásztázási sebesség (u) kétváltozós függvénye. Itt jegyezzük meg, hogy a (8) képlet helyett egy másik változó is kifejezhető és kiiktatható, így egy izoenergetikus felület mentén az ütőmunka P és t vagy t és u függvényében is kifejezhető.

A **3. ábra** a **6. táblázat** első oszlopában szereplő teljesítménysűrűségi értékekhez tartozó izoenergetikus felületek mentén mutatja az ütőmunkát a lézerteljesítmény és a pásztázási sebesség függvényében. A $32,150 \text{ W/mm}^3$ -hez tartozó izoenergetikus felületet az ábrán kihagytuk, mert csak egy kísérleti pont van rajta.

Megfigyelhető, hogy maga a teljesítménysűrűség nincs közvetlen összefüggésben az ütőmunkával. Ez azt jelenti, hogy a teljesítménysűrűség nem alkalmazható szabályozó mennyiségként, amikor az alkatrész szívósságát vagy ridegségét



2. ábra. Isoenergetikus felületek a kísérletek során változtatott (faktorként használt) gyártási paraméterek terében. A: 32,150 W/mm³, B: 46,296 W/mm³, C: 55,556 W/mm³, D: 66,667 W/mm³, E: 80,000 W/mm³, a fekete pontok a kísérleti beállításokat jelzik, mindegyik illeszkedik valamely isoenergetikus felülethez, az ábra mindkét része ugyanazt a függvényt mutatja két különböző nézetből



3. ábra. A (4) képletből számított ütőmunkaértékek a kísérleteinkben faktorként használt három gyártási paraméter terében levő isoenergetikus felületek mentén. Az isoenergetikus felületek az alábbi teljesítménysűrűséghez tartoznak: B: 46,296 W/mm³, C: 55,556 W/mm³, D: 66,667 W/mm³, E: 80,000 W/mm³. A J egységben megadott ütőmunkát színezéssel jeleltettük meg

6. táblázat. Azonos teljesítménysűrűséghez tartozó kísérleti beállítások

Energiabevitel, e, (W/mm ³)	Kód	Darabszám
32,150	I	1
46,296	A, G	2
55,556	C, F, J, K	4
66,667	B, E, H	3
80,000	D, L	2

kell befolyásolni. Valójában a lézerteljesítmény, a pásztázási sebesség és a rétegvastagság speciális paraméterhármását kell használni.

Lehetőség van azonban az ütőmunkát a három fontos gyártási paraméter függvényében leírni, és az isoenergetikus felületek mentén kifejezni.

4. Az eredmények értékelése

Megfigyelhető, hogy a kísérleti faktorok, a lézerteljesítmény, a pásztázási sebesség és a rétegvastagság jelentősen befolyásolják a próbatest ütőmunkáját.

Az A kódú minták ütőmunkája kiemelkedő. Megismételtük a kísérletet, és ugyanazt az eredményt kaptuk. Ez azt jelzi, hogy az anyag belső szerkezetében lényeges változás áll be, ahogy a vizsgált folyamatparaméterek hármása az A paraméterbeállítás felé közeledik. Úgy tűnik, érdemes mélyebb vizsgálatot végezni ezzel kapcsolatban.

A kísérleti adatok interpolációjával nyert empirikus képletet óvatosan kell kezelni, mert ezek elfogadható közelítést tudnak adni a tartománynak a paraméterváltozás középpontja körüli kis részén belül. Eredményeink kibővíthetők egy jövőbeni kísérleti munkával, több kísérleti beállítással. Nagyobb számú mérés esetén az interpolációs polinom fokszáma is növelhető túlllesztés nélkül. Egy teljes harmadrendű interpolációhoz három változó esetén legalább 20 mérési pontra van szükség, de inkább többre.

A (4) képlet azt mutatja, hogy az ütőmunka messze nem lineáris függvénye a lézerteljesítménynek, a pásztázási sebességnek és a rétegvastagságnak még kis paraméterablakon belül sem.

A tiszta másodrendű és vegyes tagoknak egyaránt jelentős együtthatói vannak.

A nemlineáris viselkedés mögött az SLM (és általában az additív gyártás) összetett természete feltelezhető. Az ütömunkát jelentősen befolyásolja az anyag porozitása, a metallográfiai mikroszerkezet, a felület minősége és a maradófeszültségi állapot. Mindezek a tulajdonságok a gyártási paramétereiktől függenek.

5. Következtetések

A szelektív lézeres olvasztással (SLM) előállított minták ütömunkáját Charpy-féle ütömővel mértük. A próbatetek különböző gyártási paraméterekkel készültek. Három gyártási paramétert, a lézerteljesítményt, a pásztázási sebességet és a rétegvastagságot változtattuk, az egyéb paraméterek állandók maradtak. A kísérletiparaméter-beállításokat a részleges faktoriális kísérlettervezés módszerével állítottuk össze.

A mérési eredmények jelentős eltéréseket mutatnak a különböző gyártási paraméterekkel készített próbatetek esetén. A legkisebb átlagérték 8,8 J, míg a legnagyobb átlagérték 16,8 J, ami több mint kétszerese az előzőnek. Ez azt jelzi, hogy az ütömunka olyan anyagtulajdonság, amely nagyon érzékeny a jelen tanulmányban vizsgált gyártási paraméterekre.

A kísérleti adatokra interpolációs eljárással kvantitatív háromváltozós tapasztalati képletet illesztettünk. Ez egy másodrendű polinomos képlet. Megfigyelhető, hogy a tiszta másodrendű és kölcsönhatási tagok együtthatói egyaránt jelentősek, ami azt jelenti, hogy az ütömunka erősen nemlineáris függvénye a gyártási paramétereknek.

Egy képletet származtattunk az izoenergetikus felületek mentén fellépő ütömunka kiszámítására. Az izoenergetikus itt azt jelenti, hogy a felület pontjai által reprezentált paraméterhármasok ugyanahhoz az energiabevitelhez (teljesítménysűrűség) tartoznak.

Mivel az ütömunka rendkívül fontos anyagjellemző, ez az empirikus képlet hasznos eszköz lehet az SLM-es gyártási paraméterek függvényében annak előrejelzésére vagy optimalizálására.

Köszönetnyilvánítás

Ezt a munkát a GINOP-2.2.1-15-2017-00055 „Implantátumok oszteoszintézisének és trabekuláris struktúrák fejlesztésének kutatása additív gyártás alkalmazásával” című pályázati projekt támogatta. A szerzők köszönetet mondanak a Debreceni Egye-

tem Biomechanikai Laboratóriumának a próbatetek gyártásáért és a Nyíregyházi Egyetem Anyagvizsgáló Laboratóriumának a mérésekért.

A dolgozat közzétételét a Nyíregyházi Egyetem Tudományos Tanácsa támogatta.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Gisario A., Kazarian M., Martina F., Mehrpouya M.: *Metal Additive Manufacturing in the Commercial Aviation Industry: A Review*. Journal of Manufacturing Systems, 53. (2019) 124–149. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.08.005>.
- [2] Javaid M., Haleem A.: *Additive manufacturing applications in medical cases: A literature based review*. Alexandria Journal of Medicine, 54/4. (2018) 411–422. <https://doi.org/10.1016/j.ajme.2017.09.003>
- [3] Esmaeilian B., Behdad S., Wang B.: *The evolution and future of manufacturing: A review*. Journal of Manufacturing Systems, 39. (2016) 79–100. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.08.005>
- [4] Thomas-Seale L. E. J., Kirkman-Brown J. C., Attallah M. M., Espino D. M., Shepherd D. E. T.: *The barriers to the progression of additive manufacturing: Perspectives from UK industry*. International Journal of Production Economics, 198. (2018) 104–118. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.02.003>
- [5] Dezső G., Kósa P.: *Dimensional and shape accuracy of cylindrical and parallelepiped-like parts made by selective laser melting technology*. Annals of Faculty of Engineering Hunedoara, International Journal of Engineering, 18/1. (2020) 39–45.
- [6] Buican G. R., Oancea G., Lancea C., Pop M. A.: *Influence of Layer Thickness on Internal Structure of Parts Manufactured from 316-L Steel Using SLM Technology*. Applied Mechanics and Materials, 809–810. (2015) 369–374. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.809-810.369>.
- [7] Yang H. et al.: *Six-Sigma Quality Management of Additive Manufacturing*. Proceedings of the IEEE, 109/4. (2021) 347–376. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.3034519>
- [8] Yap C. Y. et al.: *Review of selective laser melting: Materials and applications*. Applied Physics Reviews, 2/4. (2015) 041101. <https://doi.org/10.1063/1.4935926>
- [9] Shipley H. et al.: *Optimisation of process parameters to address fundamental challenges during selective laser melting of Ti-6Al-4V: A review*. International Journal of Machine Tools and Manufacturing, 128. (2018) 1–20. <https://doi.org/10.1063/1.4935926>
- [10] Pacurar R., Balc N., Prem F.: *Research on how to improve the accuracy of the SLM metallic parts*. AIP Conference Proceedings, 1353/1. (2011) 1385–1390. <https://doi.org/10.1063/1.3589710>

- [11] Cosma C., Balc N., Moldovan M., Morovic L., Gogola P., Borzan C.: *Post-processing of customized implants made by laser beam melting from pure Titanium*. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 19/11–12. (2017) 738–747.
- [12] Material data sheet: EOS Titanium Ti64ELI. EOS GmbH - Electro Optical Systems, 2014. (accessed on 25 May 2021)
<https://www.sculpteo.com/media/imagecontent/EOS-Titanium-Ti64ELI.pdf>
- [13] Aoki S., Takemura A.: *Design and Analysis of Fractional Factorial Experiments From the Viewpoint of Computational Algebraic Statistics*. Journal of Statistical Theory and Practice, 6/1. (2012) 147–161.
<https://doi.org/10.1080/15598608.2012.647556>
- [14] Baudin M., Couvert V., Steer S.: *Documentation of Scilab function OPTIM*. The Scilab Consortium – Digiteo / INRIA, 2010.
https://www.scilab.org/sites/default/files/optimization_in_scilab.pdf (accessed 25 May 2021)