

Laser bidezko prozesu gehigarrietarako hauts- elikagailuen azterketa eta kalibrazioa

(Analysis and calibration of powder feeders used in laser based
additive processes)

Jon Iñaki Arrizubieta*, Aitzol Lamikiz, Eneko Ukar, Naiara Ortega

Mekanika Saila. Bilboko Ingeniaritza Eskola. Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU)

LABURPENA: Ikerlan honetan gaur egun fabrikazio gehigarri zuzenerako, ingelesez LMD deitua, erabiltzen diren hauts-elikagailuen alderaketa aurkeztu da. Bakoitzaren ezaugarriak aztertu ostean, LMD prozesurako egokienak zeintzuk diren ondorioztatu da: Grabitatean oinarritutako disko birakariko elikagailuak eta jariakortasunean oinarritutako elikagailuak. Gainera, gaur egun hedatuen dagoen elikatze-sistemaren, grabitatean oinarritutako disko birakariko hauts-elikagailua, material desberdinentzako kalibrazio-kurbak eskuratzeko metodologia proposatu da eta lorturiko emaitzak esperimentalki balioztatu dira. Kalibrazio-kurbak Inconel 718, AISI 316L eta Stellite 6 materialentzat kalkulatu dira, eta, lortutako emaitzetan oinarrituz, sistemaren portaera lineala dela ondorioztatu da. Bestalde, material desberdinen kalibrazio-kurbak definitzen dituen ekuazio bararra zehaztu da; trinkotze-koefiziente deituriko parametroa erabili da horretarako.

HITZ GAKOAK: Laser bidezko ekarpena, hauts-elikagailuak, egonkortasuna, trinkotze-koefizientea.

ABSTRACT: A stable powder feeding system is a key element for achieving the desired results in powder-based processes, such as, Laser Metal Deposition (LMD). Therefore, in the present research paper a comparison between the different existing feeder configurations is presented. After analyzing their characteristics, it is concluded that for the LMD process gravitation-based rotary feeders and fluidization-based feeders provide the best results. Besides, a methodology is proposed for obtaining the calibration curves of gravitation-based rotary feeders and results are presented for various metallic powders, such as Inconel 718, AISI 316L and Stellite 6. It is concluded that the powder feeder behaves lineally, what eases its programming. Furthermore, a single equation that determines the real powder feed rate of different materials based on the rotation speed is determined. For this purpose, the packaging coefficient of the metallic particles is defined and calculated.

KEYWORDS: Laser Metal Deposition, powder feeders, stability, packaging coefficient.

* **Harremanetan jartzeko / Corresponding author:** Jon Iñaki Arrizubieta, Mekanika Saila. Bilboko Ingeniaritza Eskola. Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU). Ing. Torres Quevedo Plaza, 1 (48013 Bilbo-Bizkaia). – joninaki.arrizubieta@ehu.eus – <https://orcid.org/0000-0002-6030-4941>.

Nola aipatu / How to cite: Arrizubieta, Jon Iñaki; Lamikiz, Aitzol; Ukar, Eneko; Ortega, Naiara (2019). «Laser bidezko prozesu gehigarrietarako hauts-elikagailuen azterketa eta kalibrazioa»; *Ekaia*, 36, 2019, 275-290. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.20749>).

Jasoa: 11 apirila, 2019; Onartua: 12 uztaila, 2019.

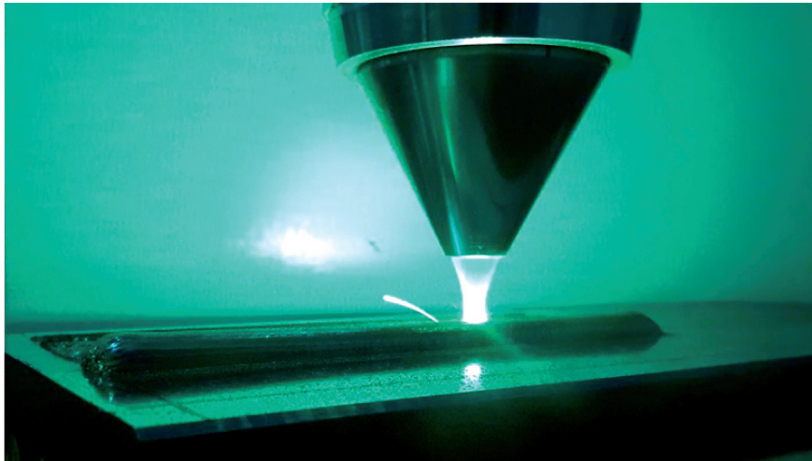
ISSN 0214-9001 - eISSN 2444-3255 / © 2019 UPV/EHU



Obra hau Creative Commons Atribución 4.0 Internacional-en lizentziapean dago

1. LMD PROZESUAREN OINARRIAK

Laser bidezko ekarpen prozesua, Ingelesez Laser Metal Deposition (LMD) deitua, pieza metalikoen fabrikazio zuzenerako prozesu gehigarria da [1]. Prozesu horretan, laser-izpia aplikazio horretarako bereziki diseinatuta dagoen pita batetik zehar igarotzen da (ikus 1. irudia); pita hori da hauts formatuko material gehigarria koaxialki lan-gunera bideratzeaz arduratzen dena.

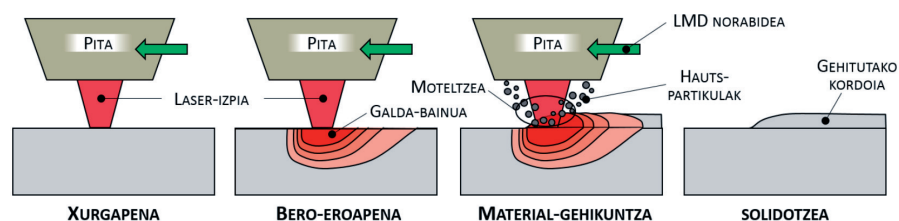


1. irudia. LMD prozesuaren argazkia. Pitak hauts formatuko materiala oinarriaren gainazalean kontzentratzen du, laserrak urtu bitartean.

LMD prozesua laser-izpian oinarritzen da materialaren gainazalean urtutako galda-bainua sortzeko. Laserra erabiltzearen arrazoi nagusia berotutako honek bestelako iturriekin alderatuz, arku elektrokoarekin edo plasma-rekin esaterako, eskaintzen dituen abantaila teknikoak dira. Laser-izpiaren propietateei esker (argi monokromatiko eta koherentea), argia azalera txikian kontzentratzea ahalbidetzen da (0,1 eta 2 mm bitarteko diametroak); ondorioz, prozesurako beharrezkoa den guztizko energia kopurua txikiagoa da, eta horrek piezaren barne-tentsioen eta termikoki eragindako gunearen murrizpena dakar [2].

Materiala gehitzearen eragiketa bakarra den arren, gertatzen diren fenomenoak errazago ulertzeko helburuarekin, 2. irudian erakusten den bezala, prozesua azpi-etapa aniztatan banandu daiteke. Laser-izpiak oinarri-materialaren gainazala erasotzen duenean hasten da prozesua. Energiaren ehuneko bat oinarriak xurgatuko du, eta gainerakoa islatu eta galdu egingo da. Bigarren pausu batean, oinarriak xurgatzen duen beroa, eroankortasuna

dela medio, bere barnerantz hedatzen dela onar daiteke. Laser-izpia posizio zehatz batean mantentzen deneko denbora hazten den heinean, oinarriaren tenperaturak igotzen jarraituko du, eta materiala urtu eta galda-bainua sortuko da.



2. irudia. LMD prozesuaren azpi-etapak.

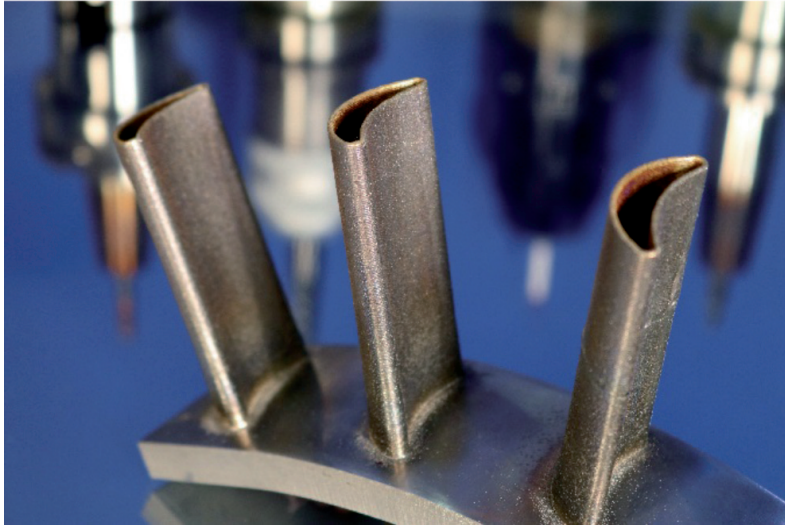
Hirugarren pausuan, aurrerago aipatu den pitatik zehar igarotzen den material gehigarria urrutako materialean injektatuko da, berau ere urtuz eta oinarri-materialarekin bat eginez. Azkenik, laugarren pausuan, laser-izpia fabrikatu nahi den piezaren gainetik mugituz doan heinean, aurreko denbora-aldiunean urtuta zegoen materiala solidotu egingo da.

Aldiune jakin batean urrutako materialaren bolumena piezaren bolumen totalarekin alderatuz oso txikia denez, gainerako piezak bero-xurgagailu lana egiten du eta hozte-abiadura oso bizkorak lortzen dira. Dindak zenbatetsi zuen bezala, 10^3 - 10^5 K · s⁻¹ bitarteko hozte-abiadurak ohikoak dira LMD prozesuan [3]. Gainera, prozesu honek oinarriaren eta gehitutako materialaren arteko lotura mekanikoa bermatzen du, baina ez hori bakarrik, lotura metalurgikoa ere bermatzen da, eta ondorioz, bukaerako piezaren propietate mekanikoen jarraikortasuna [4].

Gehitutako materiala solidotu eta hoztean, pitak jarraitzen duen ibilbidean zehar lerro bat sortuko da, zeinaren geometria prozesuan erabilitako parametroen menpekota izango baita. Lerro anitzen gainjartzeari esker, gehituriko materialaren azalerak sortuko dira, eta, azkenik, azalerak bata bestearen gainean kokatuz, geruzaz geruza, nahi den bukaerako hiru dimentsioko geometria lortuko da.

2. LMD PROZESUAREN EZAUGARRIAK

LMD prozesua fabrikazio gehigarri zuzeneko teknologia da, eta haren ezaugarri nagusia material gehigarria zuzenean pitaren baretik urrutako galda-bainura injektatzea da. Horri esker, % 100 dentsuak eta galdaketa bidez fabrikaturiko piezen propietateekin alderagarriak diren ezaugarriko piezak fabrikatu daitezke [4].

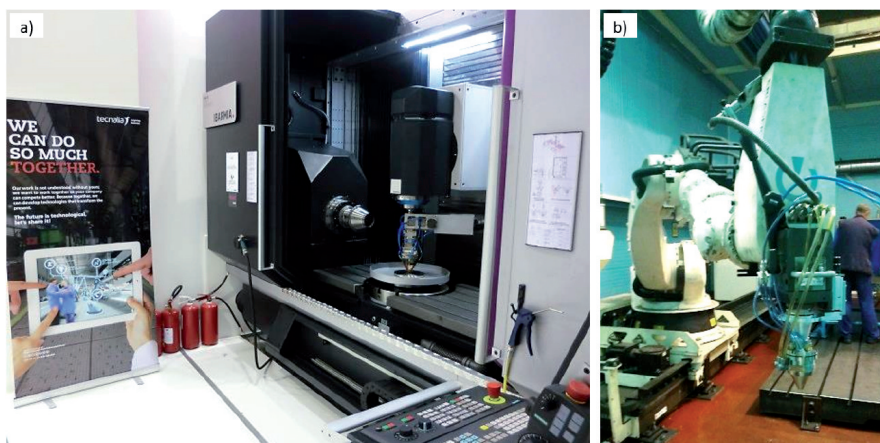


3. irudia. LMD bidez fabrikaturiko Inconel 718ko akziozko palak.

Prozesu hau aplikazio anitzetarako erabil daitezkeen arren (osoko piezen fabrikaziorako, besteak beste), ohikoena jadanik fabrikatuak dauden piezen gainean xehetasunak gehitzeko erabiltzea da. Izan ere, LMD prozesuak kalteturiko piezen konponketa edo gainazal propietateen hobekuntza ahalbidetzen du. Are gehiago, prozesu horren bidez material desberdinak aldi berean gehi daitezke, bukaerako piezaren gune bakoitzean behar diren ezaugarrien arabera, eta material-gehigarriaren konposizioa eta, ondorioz, propietateak alda daitezke.

LMD prozesuaren oinarri den pita mekanizazio-zentroen antzeko makina kartesiarrean edo robot antropomorfikoan munta daiteke (ikus 4. irudia). Ondorioz, fabrikatu daitezkeen piezen gehienezko tamaina pita muntatuta dagoen sistemak mugatzen du, eta horrek tamaina txiki zein handiko piezen fabrikazioa ahalbidetzen du, prozesuari malgutasun handia emanez.

Erabilitako ekipoen arabera prozesu-aldagaien balioak desberdinak diren arren, LMD prozesuan ohikoa da $5\text{-}30 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ bitarteko materialaren gehitze-tasa erabiltzea [6]. Oro har, LMD bidez fabrikaturiko piezek ez dute gainazal akabera ez zehaztasun handirik, $45\text{-}200 \mu\text{m}$ eta $\pm 0.2 \text{ mm}$, hurrenez hurren [7]. Baina babeseko atmosferaren erabilerari esker, integritate metalurgiko altuko piezak lor daitezke. Are gehiago, prozesuak erabiltzen duen energia-maila totala baxua denez, bukaerako piezen agertzen diren distorsio geometrikoak murriztu egiten dira, bai eta arrakalen agerpena ere [2]. Horri esker, posible da LMD teknologiaren bidez hainbat materialei aplikatzea.



4. irudia. LMD sistemarentzako muntaia-aukera desberdinak: a) Ibarmiaren ma-
kina hibrido kartesiarra [5]; b) Robot antropomorfikoa.

Material gehigarria bi modutan txerta daiteke urrutako galda-bainuan, hari- edo hauts-formatuan. Haria erabiltzen duten prozesuen elikadura-sistema askoz garatuago dauden soldadura-ekipoetan oinarritzen denez [8], arlo honetako berrikuntzak gutxi dira. Hauts-formatuko material gehigarria erabiltzen duten makinak berritzaileagoak dira, eta, hortaz, LMD prozesuak beharrezkoa duen hauts-emari zehatza eta egonkortasuna eskaintzeko gai diren elikagailuen azterketa ezinbestekoa da.

3. LMD PROZESUAN ERABILITAKO HAUTS-ELIKAGAILUAK

LMD prozesuko aldagairik garrantzitsuenetakoa pitara bideratzen den hauts-fluxua da, hau da, prozesuak urrutako galda-bainura bideratzen duen denbora-unitateko hauts kopurua [9]. Masa-fluxuak ez du bakarrik prozesu gehigarriaren ondoriozko kordoi-altueraren gain eragin zuzena [10], prozesuaren egonkortasunean ere eragin zuzena dauka [11]. Hortaz, LMD prozesuan emaitza onargarriak lortu nahi badira, funtsezkoa da hauts-emari konstantea bermatzea.

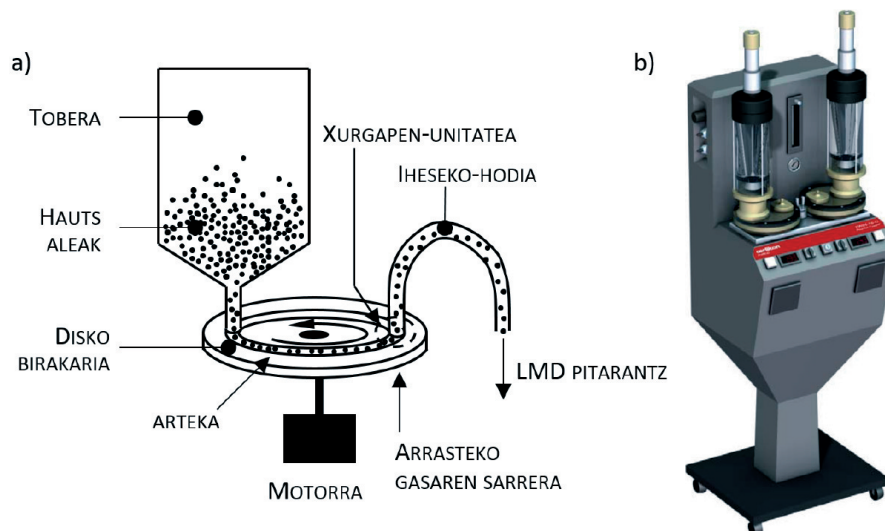
LMD prozesuan erabiltzen diren hauts mota askotarikoak direla eta (tamaina, forma, propietatea, ... ezberdinekoak), kasik ezinezkoa da horiek guztiak hauts-elikagailu mota bakarrarekin elikatzea. Hauts-elikagailu mota egokiaren aukeraketa funtsezkoa da hauts-fluxu egonkorra lortzeko. Hauts-elikagailuak beren lan-printzipioaren arabera sailkatzen dira, eta honako 4 mota hauek bereiz daitezke aplikazio industrialetarako [1]:

1. Grabitatean oinarrituriko hauts-elikagailuak.

2. Torloju biratzailean oinarrituriko hauts-elikagailuak.
3. Fluidizazioan oinarrituriko hauts-elikagailuak.
4. Dardarazko hauts-elikagailuak.

3.1. Grabitatean oinarrituriko hauts-elikagailuak

Beren sinpletasun eta fidagarritasunari esker, grabitatean oinarrituriko hauts-elikagailuak ia ziurtasun guztiz gaur egun hedatuak dauden elikagailu mota dira. Merkatuan mota askotakoak aurki daitezke, baina LMD aplikaziorako ohikoenak emaria kontrolatzeko disko birakaria erabiltzen dutenak dira. 5. irudiko disko birakario grabitatezko hauts-elikagailuaren eskema erakusten da. Grabitate-indarrari esker, toberan dagoen hautsa beherantz doa, eta diskoan horretarako bereziki diseinatuta dagoen zirkulu formako artekara eroriko da. Hauts-fluxu egokia bermatzeko eta galkatzea saihesteko, ohikoa da toberaren barnean irabiagailuak izatea. Artekara erortzen den hautsa, diskoaren biraketa dela medio, mugituz joango da, eta, xurgapen-unitatera heltzen denean, elikagailu barneko gainpresioari esker hautsa iheseko hoditik zehar irten eta pitara garraiatua izango da.



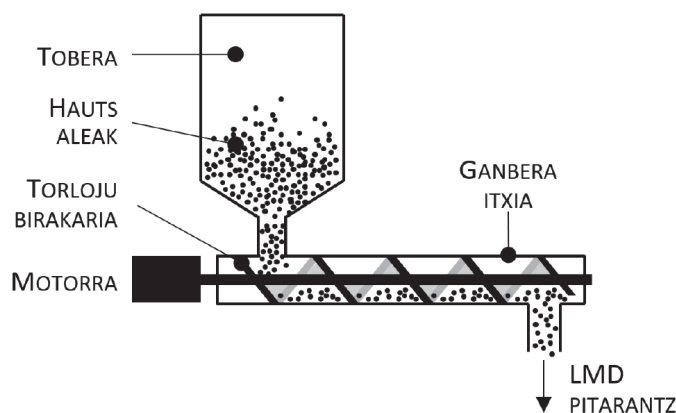
5. irudia. a) Grabitatean oinarritutako disko birakario hauts-elikagailuaren eskema; b) tobera bikoitzeko elikagailua.

Hautsaren fluxu masikoa artekaren tamaina eta biraketa-abiadura bidez kontrolatzen da. Hala ere, diskoak biraketa-abiadura tarte batean bakarrik

funtzionatuko du egokiro, hortik kanpora ez baitu bermatuko biraketa-abiadura egonkorra, eta, ondorioz, ezta hauts-fluxu konstantea ere. Hortaz, prozesuaren beharrezko araberako, diskoaren biraketa-abiadura fabrikatzaileak gomendaturiko abiadura-mugen barnean mantentzeko, ohikoa da artekaren tamaina aldatzea. Gainera, elikagailu hauek portaera lineala erakusten dute eta honek hauts-fluxuaren kontrola errazten du.

3.2. Torloju biratzailean oinarrituriko hauts-elikagailuak

Elikagailu hauek biraka ari den torloju batean oinarritzen dira, eta torloju hau arduratzen da altuera handiagoan kokatzen den toberan dagoen hautsari bultzatzea. Beharrezkoak diren hauts-emari desberdinetarako funtzionamendu egonkorra bermatzeko torlojuen konfigurazio asko aurki daitezke merkatuan. Hala ere, sistema mota hau ez da oso erabilia LMDko aplikazioetan pairatzen duten marruskadura handiagatik, eta, horren ondorioz, torlojuak denbora luzez lan egitean izaten duten higaduragatik.



6. irudia. Torloju biratzailean oinarritutako hauts-elikagailuen eskema.

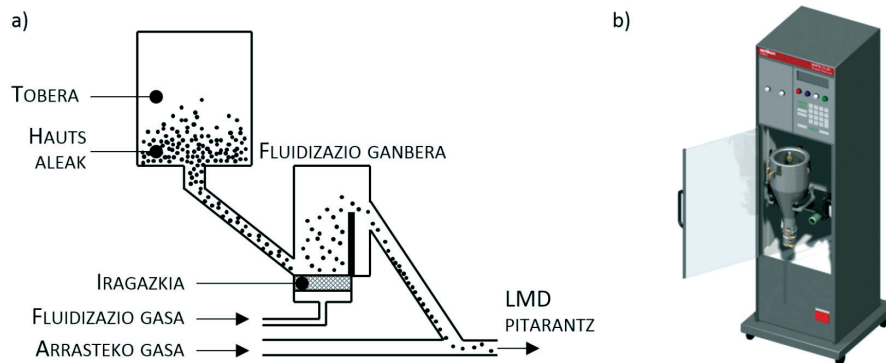
6. irudian ikus daitekeen bezala, hautsa goragoko posizioan kokaturiko toberan biltegitratzen da eta grabitatez ganbera itxi batera erortzen da. Ganbera horren barnean hautsa irteerantz bultzatzen duen torloju birakaria dago. Hauts-elikagailu mota horietan elikadura-tasa biraketa-abiadurarekiko proportzionala da; hortaz, denbora-unitateko irteten den hauts kopurua motorraren biraketa-abiaduraren bidez kontrola daiteke. Sistema hauek torlojuaren biraketa-abiadura 1-15 bira minutuko abiadura tartean lan egiteko gaitasuna daukate, % 0,05eko perdoiarekin abiadura maximoko funtzionamendu egoeran [12].

3.3. Fluidizazioan oinarrituriko hauts-elikagailuak

Elikagailu hauen funtzionamendua hauts-aleen fluidizazio-printzipioan oinarritzen da, eta LMDko prozesuan erabiltzen den pitarainoko garraioa fluidizazio-egoera horretan egiten da, elikagailuan eta arrasterako gas bera erabiliz. Fluidizazioan oinarrituriko hauts-elikagailuek eraikuntza sinplea dute, elementu mekanikoen arteko mugimendu eza eta hauts-emari baxu eta ertainetarako egonkortasunaren abantailak eskaintzen dituzte [13].

Elikadura-sistemaren funtzionamendua honako hau da: gas-emari jakina hautsa barnean daukan ganbera itxira sartzen da. Gas-fluxua ganberaren behealdean kokaturiko iragazkitik zehar igaro eta difuso bihurtzen da, biltegian dagoen hautsa bere baitan fluidizatuz, eta ondorioz, barnean harapatuz, ikus 7. irudia. Behin hautsa fluidizatua izan denean, gas-emaria oztopo baten gaineretik igaroarazten da, LMD prozesuko pitara helaraziko den hauts-emaria kontrolatu ahal izateko.

Azken hamarkadetan zehar konfigurazio desberdin gutxi batzuk agertu izan diren arren, haien artean alderatuz gero, guztiek daukate abantailak eta desabantailak, eta bakoitza material jakin baterako edo batzuetarako izango da egokia. Aurki daitezkeen konfigurazio askotarikoak Suri eta Horiok laburbildu dituzte [14].

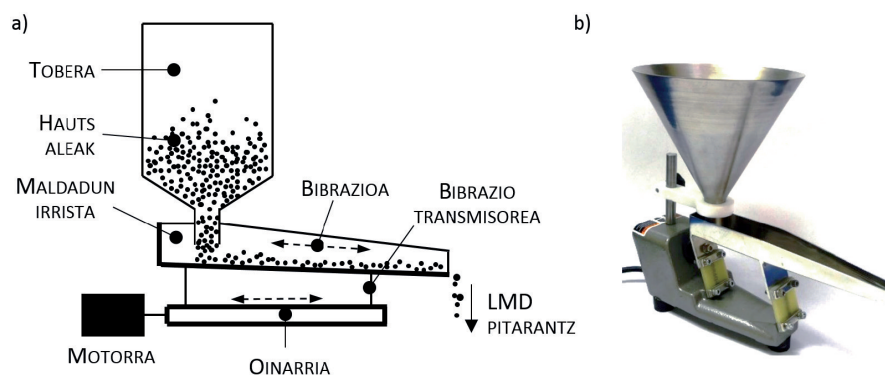


7. irudia. a) Fluidizazioan oinarritutako hauts-elikagailuaren eskema; b) elikagailuaren argazkia.

3.4. Dardarazko hauts-elikagailuak

Dardarazko hauts-elikagailuen diseinua oso sinplea da, eta kanpoko elementu bibratzaile batek kitzikaturiko malda zehatzeko irristan oinarritzen dira. Toberatik irteten diren hauts-aleak irristan zehar jauzika doaz irteerara heldu arte [15]. Dardarazko hauts-elikagailuak egokiro funtzionatzen du 8 eta 2.000 $g \cdot min^{-1}$ bitarteko fluxu masikoentzat, $\% \pm 1$ eko

zehaztasunarekin [1]. Azpiko 8. irudian mota honetako elikatzaileen eskema eta argazki erreala erakusten dira.



8. irudia. Dardarazko hauts-elikagailuaren a) eskema; b) argazki erreala.

4. HAUTS-ELIKAGAILUEN ARTEKO ALDERAKETA

Azpiko taulan aurreko atalean deskribaturiko hauts-elikagailuen arteko alderaketa aurkezten da. Taula honetan, hauts-elikagailuentzat garrantzitsuenak diren parametroak aztertzen dira, hala nola hauts-emarien tartea, higadura lasterra agertzeko aukera eta egonkortasuna.

1. taula. Aztertutako hauts-elikagailuen arteko alderaketa.

Elikagailu mota	1. Grabitatean oinarriturikoak	2. Torloju biratzaileen oinarriturikoak	3. Fluidizazioan oinarriturikoak	4. Dardarazkoak
Hauts emarien tartea	1-1.000 g · min ⁻¹	1-15 rpm	5-300 g · min ⁻¹	8-2.000 g · min ⁻¹
Higadura lasterra	BAI	BAI	EZ	EZ
Egonkortasuna	ONA	—	ONA	ONA, baina hauts-fluxu baxuetan (< 8 g · min ⁻¹) egonkortasun arazoak

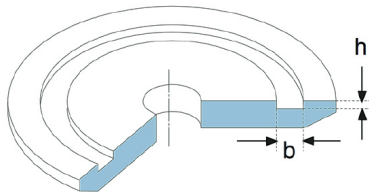
LMD prozesuan hauts-emari baxuen erabilera oso ohikoa da, bereziki oinarriarekin atxikitze zailak diren edo arrakalatzeko joera duten materialekin lan egiten denean. Horregatik, LMDrako aukerarik onenak grabi-

tatean eta fluidizazioan oinarrituriko hauts-elikagailuak direla ondoriozta daiteke, 1 eta 3 motak, hurrenez hurren.

Higadura lasterra agertzeko arazoa kontuan izanez gero, produkzioarako fluidizazioan oinarrituriko hauts-elikagailuak hobeak direla onar daiteke. Izan ere, ordu askoko erabilera jarraituaren ondorioz, grabitatezko hauts-elikagailuen disko biratzailea higatu eta aldizka prozesua gelditu eta aldatu egin beharko da. Nolanahi ere, ikerkuntzarako, non makina ez dagoen etengabe lanean eta lan-baldintzen aldakortasun handiagoa behar den, grabitatean oinarrituriko hauts-elikagailuen erabilera zabalduago dago, hauts-emari baxuetan egonkortasun handiagoa dutelako.

5. GRABITATEAN OINARRITUTAKO HAUTS-ELIKAGAILUEN KALIBRAZIO-KURBAK

Grabitatean oinarritutako hauts-elikagailuen moldagarritasunaren arrazoiak ekipo bakarrean arteka tamaina desberdineko biraketa-diskoak koka daitezkeela da. Azpiko 9. irudian merkatuan aurki daitezkeen disko motak eta haien arteka-tamaina erakusten dira.



Disko mota	b [mm]	h [mm]
Oso mehea	3,5	0,3
Mehea	5,0	1,0
Estandarra	16,0	1,2

9. irudia. Biraketa-diskoaren artekaren dimentsioak eta aurki daitezkeen mota desberdinak.

Kalibrazio-kurben zehaztapenerako arteka mehea erabili da, honek LMD prozesurako ohikoak diren hauts emarrietan, $1-50 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, funtzio-namendu egonkorra duelako.

5.1. Erabilitako materialak

Grabitatezko hauts-elikagailuaren kalibrazio-kurbak lortzeko hiru material desberdin erabili dira: AISI 316L altzairu herdoilgaitza, kobalto oinarri duen Stellite 6a eta nikela oinarri duen Inconel 718 aleazio termorresistentea. Hiru kasuetan hauts-partikulak argoi bidez atomizatuak izan dira; horrek partikulen esferikotasuna bermatzen du.

5.2. Hautsaren trinkotze-koefizientearen zehaztapena

Toberatik disko biratzaileko artekara erortzen den hautsaren bolumen-trinkotzea jakitea beharrezkoa da hauts-elikagailuaren irteerako hauts-emaria biraketa-abiaduraren eta artekaren dimentsioen arabera kalkulatzeko. Formula horren zehaztapenerako honako metodologia honi jarraitu zaio:

1. $5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ bolumeneko plastikozko ontzia hutsik dagoenean, pisatu eta goraino bete da aztertu nahi den materialaren hautsarekin. Horren ostean, berriro pisatu da, eta, pisu diferentziarekin, material jakin baten hautsaren itxurazko dentsitatea kalkulatu da.
2. Bigarren pausuan, materialaren itxurazko dentsitatea eta dentsitate errearen arteko alderaketa egin da, eta trinkotze mailaren balioa kalkulatu.

2. taula. Aztertutako hautsen ezaugarriak eta trinkotze-koefizientea.

Materiala	Hauts-aleen tamaina [μm]		Ontziaren pisua [g]	Bolumena [m^3]	Itxurazko dentsitatea [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	Dentsitate erreala, ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	Trinkotze koef. [-]
	min	MAX					
AISI 316L	45	125	228,95	$5,00 \cdot 10^{-5}$	4.579,00	7.960,00	0,58
Stellite 6	45	106	239,19	$5,00 \cdot 10^{-5}$	4.783,80	8.440,00	0,57
Inconel 718	45	106	231,30	$5,00 \cdot 10^{-5}$	4.626,00	8.220,00	0,56

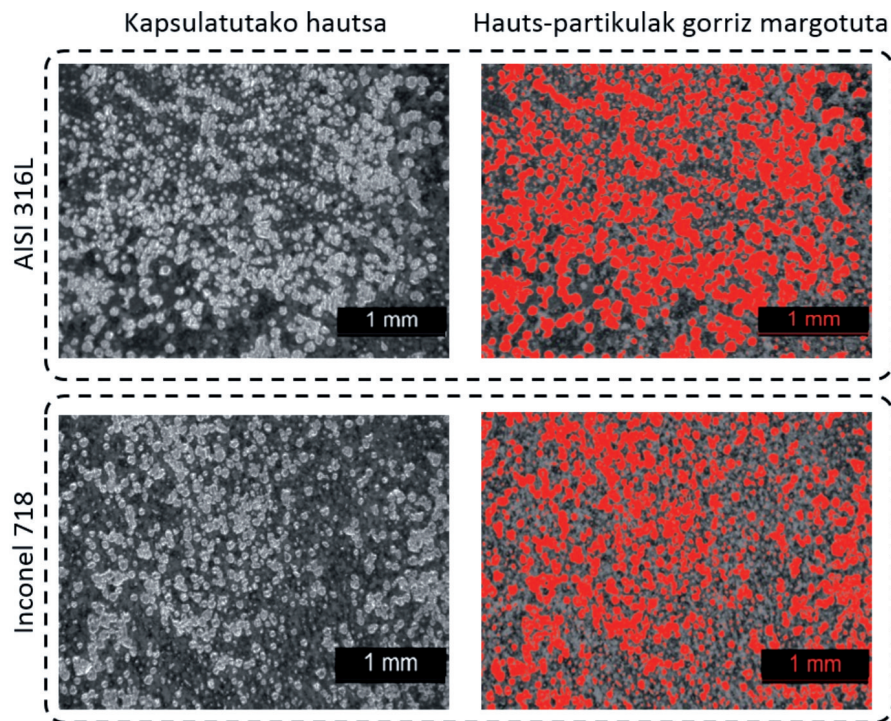
2. taulan ikusten den bezala, trinkotze-koefizientea oso antzekoa da material eta hauts-tamaina desberdinentzat; hortaz, hurbilpen gisa 0,57ko balioa ezarri da kasu guztientzat. Hortaz, honako hau da grabitatean oinarritutako hauts-elikagailuaren hauts-emaria kalkulatzeko duen ekuazioa:

$$Q = 0,57 \cdot \frac{\rho \cdot 10^3}{10^9} \cdot b \cdot h \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot N \approx 3,581 \cdot \frac{\rho \cdot b \cdot h \cdot R \cdot N}{10^6}$$

non, $Q[\text{g} \cdot \text{min}^{-1}]$ hauts-elikagailuaren irteerako hauts-emaria den, $\rho[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ materialaren dentsitate erreala, $b[\text{mm}]$ eta $h[\text{mm}]$ hauts-elikagailuaren diskoko artekaren zabalera eta sakonera diren, hurrenez hurren, $R[\text{mm}]$ arteka-zentroaren erradioa den eta $N[\text{rpm}]$ diskoaren biraketa-abiadura.

5.3. Hautsaren trinkotze-koefizientearen balioztatze esperimentalak

Trinkotze-maila esperimentalki kalkulatzeko, hotzetako erretxina bidez hauts-formatuko materialaren itxurazko dentsitatea neurtzeko erabilitako ontzia inguratu da, erretxina hauts-aleen arteko hutsuneetan sartu eta aleak elkarren artean lotzeko. Erretxina gogortutakoan, multzoa lixatu eta leundu da, 10. irudian erakusten den moduko sekzioa lortuz.



10. irudia. AISI 316L eta Inconel 718ren hautsa hotzeko erretxina bidez trinkotuta eta irudi-tratamendu bidez argazkiaren sekzioak moztan dituen aleak nabarmenduta.

Horren ostean, mikroskopia optiko bidez, argazkia atera zaio. Sekzioak moztan dituen hauts-aleek erretxinak baino mikroskopia-argiaren islatze maila altuagoa dutenez, erreminta matematiko bidez aleen azaleraren eta azalera totalaren arteko erlazioa kalkulatu da (ikus 3. taula).

Balioztatze esperimentalaren bidez lortutako trinkotze-koefizientea pisatze bidez kalkulaturikoaren antzekoa da, % 15 baino errore txikiagoa duena. Errore honen arrazoiak hautsa kapsulatzeko erabilitako metodoan dago; izan ere, erretxinak hauts-aleen arteko hutsuneak betetzean hauei

eragiten dien bulkada airearena baino handiagoa da; hortaz aleen arteko hutsuneak handitu egin dira. Bestalde, aipatu beharra dago bolumeneko trinkotze-koefizientea azalerako balio batekin alderatzen dela, eta horrek ere neurketan errorea sartzen duela. Hala ere, hauts-aleen trinkotzearen irudia eskuratzeko metodo baliagarritzat jo da.

3. taula. Aztertutako hautsen ezaugarriak eta trinkotze-koefizientea.

Materiala	Trinkotze-koefizientea
AISI 316	0,501
Inconel 718	0,519

5.4. Hauts-elikagailuaren kalibrazio-kurbaren balioztatzea

Elikagailuaren irteerako hauts-emaria eta diskoaren biraketa-abiaduraren arteko erlazioa zehazten duen formula balioztatzeko, aztertutako hiru hauts-formatuko materialaren emariak esperimentalki neurtu dira.

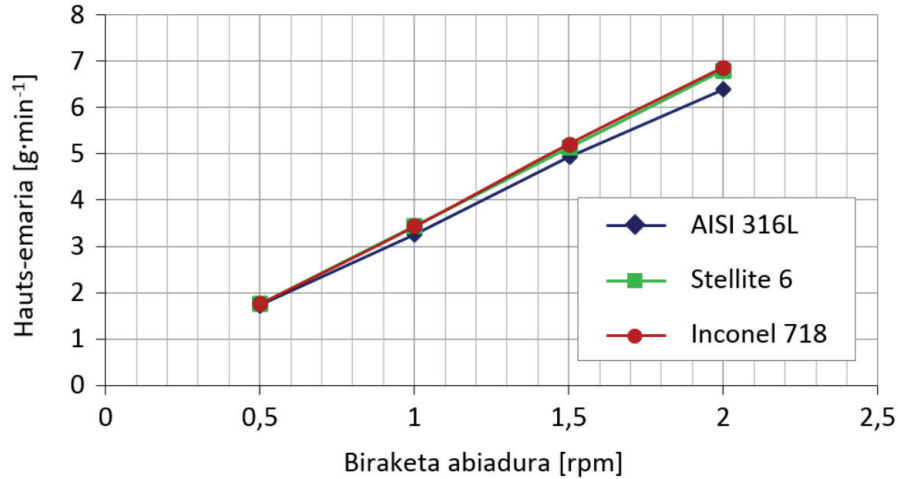
Material bakoitzarentzat 0,5, 1, 1,5 eta 2 bira minutuko abiaduretan egin dira neurketak, eta kasu bakoitzean hiru neurketa egin dira: erakusten diren balioak horien batezbestekoak dira. Neurketa bakoitzaren aurretik, hautsa biltzeko erabili den ontzia pisatu egin da, erreferentzia-balioa eta saiakuntza bakoitzean lortutako pisu-gehikuntza zehaztu ahal izateko.

Elikagailua martxan jartzean agertzen den hasierako egoera iragan-korrek eta itzaltzerakoan gerta daitezkeen ezegonkortasunek neurketaren gain izan dezaketen eragina baztertzeko, elikagailua martxan jarri eta egonkortu ostean egin dira neurketak. Horretarako, ontzia pitaren azpian jartzen den aldiunean hasi da denbora neurtzen eta neurketak irauten dituen bi minutuak igarotakoan, ontzia baztertu egin da eta gero itzali da elikagailua. Modu horretan, neurketak egoera egonkorrean egin direla bermatu daiteke.

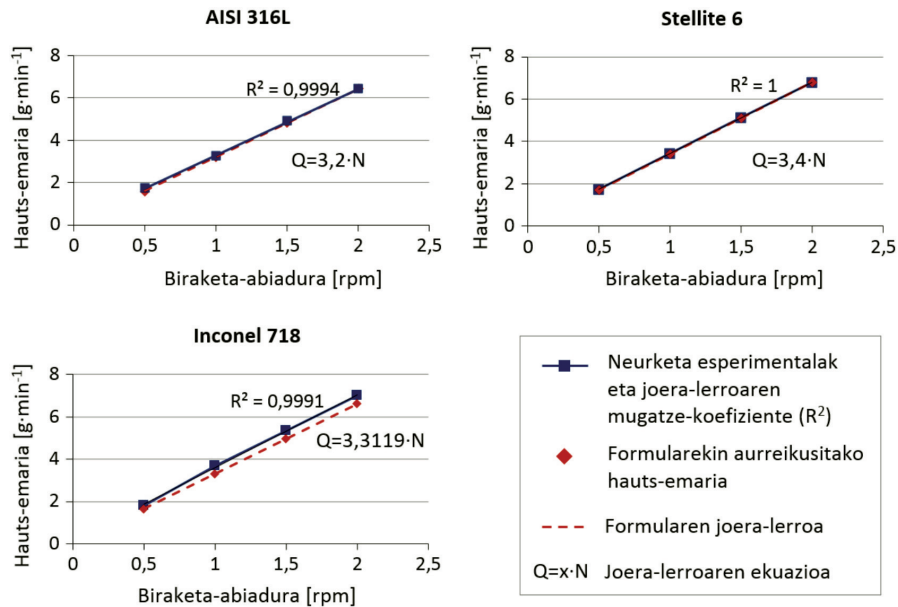
Azkenik, kalkulu-orri baten bidez biraketa-abiadura bakoitzerako ontzian pilatutako hautsaren pisuen batezbestekoak kalkulatu dira eta denbora unitateko, kasu honetan minutuko, hauts-emariak. Lortutako emaitzen adierazpen grafikoak 11. irudian erakusten dira. Biraketa abiadura berdinerako, AISI 316L materialaren fluxua txikiagoa da, material honen dentsitatea beste baina baino txikiagoa delako.

Hortaz, hautsaren trinkotze-koefizienteak lortutako kurbaren maldan eragin zuzena duela ondorioztatu da. Hala ere, badira beste parametro batzuk hauts-emarian eragina dutenak; besteak beste, hauts-partikulen jariakortasuna edo toberatik disko birakariko artekara mugitzeko duten gaitasuna. Inconel 718aren kasuan lortutako kalibrazio kurbak beste bi ma-

terioletan baino errore handiagoa erakusten du (ikus 12. irudia). Errorearen balioa ia konstantea da biraketa-abiadura desberdinetarako: honen arrazoi nagusia partikulen jariakortasun hobe da.



11. irudia. Hauts-elikagailuaren biraketa-abiadura eta irteerako hauts-emariaren arteko erlazioa, tamaina txikiko arteka erabiltzen denerako.



12. irudia. Aztertutako hautsen kalibratio-kurbak eta garatutako formularekin konparaketa.

6. ONDORIOAK

Gaur egun fabrikazio gehigarri zuzenerako erabiltzen diren hauts-elikagailuen alderaketa aurkeztu da, bakoitzaren abantailak eta desabantailak azpimarratuz. Gainera, gaur egun hedatuen dagoen elikatze-sistemaren, grabitatean oinarritutako hauts-elikagailuaren, material desberdinentzako kalibrazio-kurbak esperimentalki eskuratu dira. Lortutako emaitzetan oinarrituz, sistemaren portaera lineala dela ondorioztatu da.

Bestalde, grabitatezko biraketa-diskodun elikagailuetan biraketa-abiadura eta hauts-emia erlazionatzen dituen formula esperimentalak lortu da. Horretarako, lehendabizi hautsaren itxurazko dentsitatea lortu, eta horren ostean, trinkotze-koefizientea kalkulatu da.

Aztertutako hauts-material guztientzat (Inconel 718, AISI 316L eta Stellite 6) trinkotze-koefizientea oso antzekoa dela baieztatu da, eta honek, LMDrako erabiltzen diren hauts desberdinentzako 0,57ko trinkotze-koefiziente konstantea erabiltzea ahalbidetzen du.

Azkenik, esperimentalki neurturiko kalibrazio-kurbak eta garatutako formularen bidez aurreikusitako hauts-emarien balioak alderatu dira, eta kasu guztietan % 3ko errorea baino txikiagoa dela egiaztatu da.

Emaitza onak lortu diren arren, etorkizunean hautsaren trinkotze-koefizientean eragina duten parametro gehiago aztertuko dira, besteak beste partikulen jariakortasuna eta tobera barneko presioaren eragina. Era berean, aztertu beharreko beste parametroak hauts-elikagailuen egonkortasuna eta errepikakortasuna dira, eta, ildo honetan, saiakuntza gehiago egin beharra dago.

7. ESKERRAK

Ikerlan hau Eusko Jaurlaritzaren Elkartek 2018 programaren barneko KK-2018/00115 ADDISEND proiektuaren barnean gauzatu da. Era berean, eskerrak eman nahi zaizkio Espainiako Ekonomia, Industria eta Lehiakortasuna Ministerioari, DPI2016-79889-R INTEGRADI proiektuaren finantzaketagatik.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] TOYSERKANI, E., KHAJEPOUR, A. eta CORBIN, S. 2005. «*Laser Cladding*». CRC Press LLC.
- [2] POPRAWE, R. 2011. «*Tailored Light 2, Laser Application Technology*», Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-01236-5.

- [3] DINDA, G. P., DASGUPTA, A.K., MAZUMDER, J. 2009. «Laser aided direct metal deposition of Inconel 625 superalloy: Microstructural evolution and thermal stability». *Materials Science and Engineering A*, **509**, 98-104.
- [4] RIEDELSBERGER, H. 2013. «Laser cladding in ship and other offshore applications». *The Laser User*, **69**, 8.
- [5] <http://www.ibarmia.com/en/> (*eguneratua 2019/03/31*)
- [6] <http://www.sciaky.com/> (*eguneratua 2019/03/31*)
- [7] CORTINA, M., ARRIZUBIETA, J.I., RUIZ, J.E., UKAR, E., LAMIKIZ, A. 2018. «Latest Developments in Industrial Hybrid Machine Tools that Combine Additive and Subtractive Operations». *Materials*, **11**, 2583; <https://doi.org/10.3390/ma11122583>
- [8] ARRIZUBIETA, J.I., KLOCKE, F., KLINGBEIL, N., ARNTZ, K., LAMIKIZ, A., MARTINEZ, S. 2016. «Evaluation of efficiency and mechanical properties of Inconel 718 components built by wire and powder Laser Material Deposition Process». *Rapid Prototyping Journal*, **23** (6), 965-972.
- [9] ARRIZUBIETA, J.I.; RUIZ J.E.; CORTINA, M.; UKAR, E.; LAMIKIZ, A. 2018. «Evaluación de la sobreacumulación de material en los cambios de dirección durante el proceso de aporte por láser mediante un modelo integral». *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, **22** (2), 3-12.
- [10] OCELÍK, V., DE OLIVEIRA, U., DE BOER, M., DE HOSSON, J.T.H.M. 2007. «Thick Cobased coating on cast iron by side laser cladding: Analysis of processing conditions and coating properties». *Surface & Coatings Technology*, **201**, 5875-5883.
- [11] ARRIZUBIETA, J.I., MARTÍNEZ, S., LAMIKIZ, A., UKAR, E., ARNTZ, K., KLOCKE, F. 2017. «Instantaneous powder flux regulation system for Laser Metal Deposition». *Jon Journal of Manufacturing Processes*. **29**, 242-251,
- [12] <http://www.baystatesurfacetech.com/> (*eguneratua 2019/03/31*)
- [13] PUGSLEY, T.S., MILNE, B.J., BERRUTI, F. 1996. «An innovative non-mechanical feeder for high solids mass fluxes in circulating fluidized bed risers». *Powder Technology*, **88**, 123-131.
- [14] SURI, A., HORIO, M. 2009. «A novel cartridge type powder feeder». *Powder Technology*, **189**, 497-507.
- [15] TOLOCHKO, N.K., MOZZHAROV, S.E., ARSHINOV, M.K., ARSHINOV, K.I., IGNAT'EV, M.B. 2004. «Laws governing vibrating feeding of finely dispersed powder into a laser sintering zone». *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **43**, 9-10.