

# Fabrikazio gehigarriaren eta forjaren hibridazioa sektore aeronautikorako Inconel 718 piezen fabrikazio eraginkorrerako

(Hybridization of additive manufacturing and forging for the efficient fabrication of Inconel 718 parts for the aeronautical sector)

Oier Barrenetxea, Oihane Murua\*, Jon Iñaki Arrizubieta, Aitzol Lamikiz, Eneko Ukar

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

**LABURPENA:** Lan honetan Inconel 718 piezen fabrikazio-prozedura eraginkorragoa posible ote den aztertzeke lehen urratsak eman dira, batez ere etorkizunean sektore aeronautikoan erabiltzeko. Forja prozesuak propietate mekaniko oso onak eskaintzen ditu, baina geometria-komplexutasun mugatua dauka. Aldiz, fabrikazio gehigarriak diseinu-askatasun handia ematen du, baina prozesu honekin fabrikaturiko piezen portaeraren inguruan ziurgabetasuna handiagoa da. Hortaz, lan honetan bi prozesu horien arteko hibridazioa aztertu da, prozesu bakoitzaren alderdi ahulei aurre egiteko asmoz. Zehazki, fabrikazio gehigarriaren barneko Laser bidezko Zuzeneko Energia Gehikuntza (L-ZEG) —ingelesez L-DED— teknologia erabili da, materiala desira den gunean gehitzeko aukera eskaintzen duelako eta, beraz, hibridaziorako prozesu egokia delako. Ikerlan honetan, lehendabizi forjatutako Inconel 718 oinarriaren gainean L-DED bidez xehetasunak gehitzeko parametro optimoak zehaztu dira. Honela, loturaren kalitatea analisi metalografiko bidez baieztatuta da. Bigarren pauso batean, trakzioko saiakuntza bidez, fabrikazio-prozesu biei arteko lotura mekanikoa egokia dela ikusi da eta bi prozesuen hibridazioa bideragarria dela ondorioztatuta da.

**HITZ GAKOAK:** fabrikazio gehigarria; Inconel 718; forja; hibridazioa; lotura mekanikoa.

**ABSTRACT:** *The present work takes the first steps towards a more efficient Inconel 718 material manufacturing process, which are focused mainly on the aeronautic sector. Although the mechanical properties obtained by the forging process are excellent, the geometrical complexity is restricted. On the contrary, even if the additive manufacturing (AM) process offers a huge design freedom, there is not enough knowledge regarding the behaviour of the AM manufactured parts. Therefore, in this paper, the hybridization between the discussed two processes is researched to overcome the weaknesses of each process. Precisely, the Laser-Directed Energy Deposition (L-DED) technology is selected among the AM processes due to its potential for adding material in the desired area, and thus, it is appropriate for the hybridization. First of all, the parametrization of the deposited Inconel 718 powder on a forged base is performed and the optimum parameters for the subsequent manufacturing are obtained. A metallography analysis is carried out to ensure the quality of the results. Thereby, after performing the tensile test and obtaining correct mechanical joining values between both processes, the analysed hybridization has been concluded to be feasible.*

**KEYWORDS:** *additive manufacturing, Inconel 718, forge, hybridization, mechanical joining.*

\* **Harremanetan jartzeko / Corresponding author:** Oihane Murua. Mekanika Saila, Bilboko Ingeniaritza Eskola, Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU). Torres Quevedo ingeniariaren Plaza, 1 (48013 Bilbao). – oihane.murua@ehu.eus – https://orcid.org/0000-0002-2058-3042

**Nola aipatu / How to cite:** Barrenetxea, Oier; Murua, Oihane; Arrizubieta, Jon Iñaki; Lamikiz, Aitzol; Ukar, Eneko (2023). «Fabrikazio gehigarriaren eta forjaren hibridazioa sektore aeronautikorako Inconel 718 piezen fabrikazio eraginkorrerako». *Ekaia*, 44, 2023, 353-369. (https://doi.org/10.1387/ekaia.23771).

Jasotze-data: 2022, uztailak 1; Onartze-data: 2022, abenduak 3.

ISSN 0214-9001 - eISSN 2444-3255 / © 2023 UPV/EHU



Lan hau Creative Commons Aitortu-EzKomertziala-LanEratorririkGabe 4.0 Nazioartekoa lizentzia baten mende dago

## 1. SARRERA

Metalen fabrikazio gehigarria gero eta gehiago erabiltzen den fabrikazio-prozesua da. Izugarri eboluzionatu eta hazi da 1980. urtean H. Kodama doktore japoniarrak prototipazio azkarrerako atera zuen lehen patentetik hona [1]. Ohiko txirbil-harroketa prozesuak ez bezala, 3D eruedetatik abiatuta geruzaz geruza piezak sortzean datza metalen fabrikazio gehigarriak (FG). Ezagunak bereizgarri horrek pieza konplexuak eta pertsonalizatuak fabrikatzea ahalbidetzen dio prozesuari, erreminta edo tresneria berezien beharrez gabe. Hori dela eta, prozesu horren aplikazio gehienek pisumurrizpena edo diseinu-askatasuna bilatzen dute. Halaber, FG bidez posible da ohiko fabrikazio-prozesuekin lortu ezin diren geometria konplexuak eta osagaiak ekoiztea. Horregatik, FGaren aplikazio-sektore nagusiak medikoa, aeronautikoa, industrialia eta kontsumokoa dira.

Hala ere, prozesuari azterketa eta egiaztapen ugari falta zaizkio industria aeronautikoan eta aeroespazialean ohiko fabrikazio-prozesu gisa erabili ahal izateko. Arazo honen jatorria prozesuaren kontrol-zailtasunaren ondorioz piezetan lortzen diren propietate mekanikoen aldakortasunean dago; batez ere, nekearekin zerikusia duten propietateetan [2]. Beraz, oraindik lan gehiago egitea komeni da teknologia honen egiaztatze-prozesuetan.

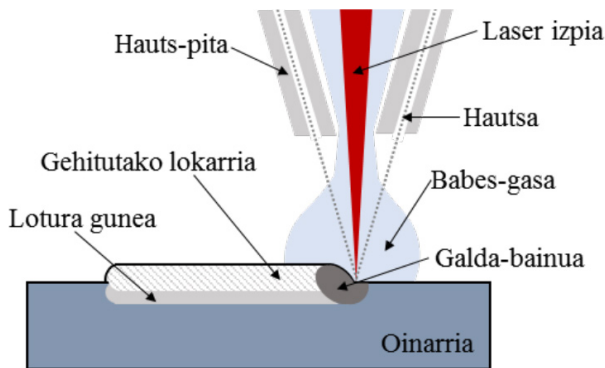
Fabrikazio-prozesu honen aldaerak bi talde nagusitan bana daitezke. Alde batetik, Hauts-Ohearen Fusioa (HOF edo, ingelesez, PBF) eta, bestetik, Zuzeneko Energia Gehikuntza (ZEG edo, ingelesez, DED) prozesuak. PBF prozesua hauts-geruza bakoitzean intereseko guneen fusio selektiboa gauzatzean oinarritzen da, helburua delarik ia % 100eko dentsitatea duten pieza konplexuak hutsetik hasita sortzea. DED prozesuetan, aldiz, pieza hutsetik sortzen hasi beharrean, materiala oinarri baten gainean gehitzen da. Horrela, aldaera hau oro har kalteturiko piezak konpontzera, estaldurak sortzera edota piezei xehetasunak gehitzera bideratzen da (1. irudia).



**1. irudia.** DED bidez gehitutako palak [3].

Hori dela eta, interes handikoa da DED prozesuak aeronautikan asko erabiltzen den forja-prozesuarekin hibridatzea posible ote den aztertzea. Forjaren bitartez propietate mekaniko oso oneko baina geometria-komplexutasun mugatuko piezak lortzen dira. Horregatik, mekanizazio-prozesu luzeak behar izaten dituzte forjatzen diren piezek helburu diren osagaiak lortzeko. Gainera, ohikoa da zailtasunak izatea aeronautikako motorretan ugari erabiltzen den Inconel 718 super aleazioa mekanizatzeke. Horrek guztiak izugarri handitzea dakar pieza bakoitza lortzeko kostuak, denbora eta beharrezko materiala.

DED prozesuen artean hedatuena energia-iturri bezala laserra eta material gehigarri gisa hautsa erabiltzen duen Laser bidezko Zuzeneko Energia-Gehikuntza prozesua da (ingelesez *Laser Cladding* eta *Laser Metal Deposition* izenekin ezaguna).

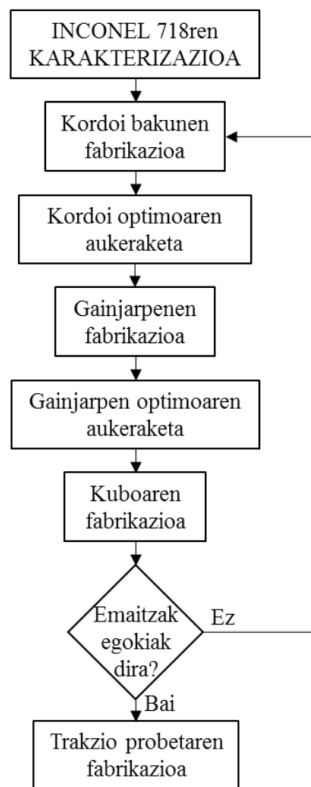


**2. irudia.** Laser bidezko Zuzeneko Energia-Gehikuntza prozesua.

Aldaera horretan, laser izpia pitarekiko ardazkide ateratzen da eta laserraren eta hauts gehigarriaren arteko elkarketa gertatzen den gunean —hau da, distantzia fokalean— oinarriko materiala urtuz sortzen da galda-bainua; ikus 2. irudia. Galda-bainuan, material gehigarriaren hauts-partikula urtuak injektatzen dira arraste-gasaren (argona) bidez. Aldi berean, pitaren eta piezaren arteko mugimendu erlatiboari esker gertatzen den hozketaren ondorioz, galda-bainua solidotu eta kordoi solido bat sortzen du. Solidotze hori oso azkar gertatzen da, nagusiki, oinarriak disipatzen duen beroaren ondorioz. Behin galda-bainua solidotuta, lotura metalurgiko sendoa lortzen da oinarriko materialaren eta gehitutako materialaren artean. Prozesu hau piezaren eta pitaren artean aurretiaz programaturiko mugimendu erlatiboaren arabera gauzatzen da. Horrela, nahi diren formako kordioak sortu daitezke eta, prozesu hori geruzaz geruza errepikatuz, helburu den hiru dimentsioko geometria lortzen da [4].

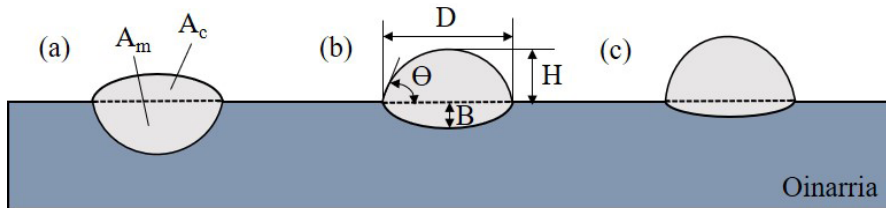
## 2. METODOLOGIA

Forja eta L-DED prozesuen arteko hibridazioa aztertzeko, lehenik eta behin forjaturiko Inconel 718 oinarriaren gainean Inconel 718 hautsa L-DED bidez gehitzeko erabili beharreko parametro optimoak definitu behar dira. Horretarako, beharrezkoa da prozesu mota honetan eragin handiena duten laserraren potentzia (P), hauts-emia (Q) eta pitaren aitzina-pen-abiadura (F) optimizatzea. Bestalde, fabrikazio optimoa aukeratzeko jarraitu beharreko prozedurari (3. irudia) dagokionez, lehenengo, kordoi bakunak, jarraian geruzak edo gainjartzeak eta, azkenik, kubo bat eraiki dira. Horregatik, bibliografian Inconel 718 materialerako bildu diren erreferentziazko balioetatik abiatuz, kordoi bakunak fabrikatzeko parametroen ekorketa egin da. Potentziarentzat 500, 550 eta 600 W-eko balioak erabili dira; aitzinamendu-abiadurarako 500, 525 eta 550  $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , eta, hauts-emarirako, 5,5 eta 6,0  $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$ -eko balioak. Horrela, guztira 18 konbinazio aztertu dira, eta bakoitzetik hiru sekzioen ikerketa sakona egin da.



**3. irudia.** Inconel 718 materialaren karakterizazioan jarraitutako metodologia.

Parametro ezberdinekin kordoi bakunak sortuta, forma-parametroa ( $H/D$ ) eta diluzioa ( $D_i$ ) aztertu dira ezaugarri geometrikoak eta kalitatea jakin ahal izateko. Horretarako, kordoiaren zeharkako sekzioa ikuskatu da analisi metalografiko bidez. Beraz, lehenik eta behin, laginak prestatu dira eta, ondoren, Leica 3DCM mikroskopia konfokalarekin sekzioen irudiak ateratzeaz gain, 4. irudian aurki daitezkeen kordoi bakunen altuera ( $H$ ), zabalera ( $D$ ) eta sakonera ( $B$ ) neurtu dira.



**4. irudia.** Kordoiaren ohiko zeharkako sekzioak: a) diluzio handiegia, b) itxura-erlazio egokia eta c) diluzio txikiegia.

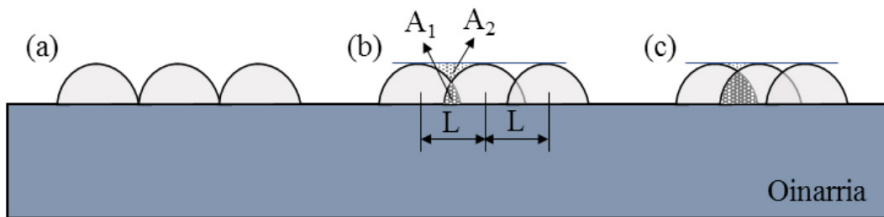
Kordoiaren forma-parametroarentzat, bibliografian 1/5 eta 1/3 arteko balioak gomendatzen dira, haren itxura-erlazioa egokia izan dadin eta gainjartzeko orduan lotura guneetan fusio-arazoak ager ez daitezen [5]. Bestalde, diluzio-parametroak oinarria urtzera bideratutako energia kuantifikatzen du eta kordoi ezberdinen arteko loturarekin ere zerikusia dauka. Diluzioaren balioa,  $D_i$ , honako adierazpenarekin kalkulatzen da:

$$D_i = \frac{B}{H + B} \quad (1)$$

Diluzioa handiegia izatea ez da desiragarria (4. irudia (a) kasua), berroak kaltetutako gunea handia delako eta produktibitatea, berriz, oso baxua. Bestalde, diluzioa txikiegia izatea ere ez da egokia (4. irudia (c) kasua), lotura urria izan daitekeelako. Hori dela eta, zenbait egilek diluzio optimoa % 10 eta % 30 bitartean dagoela ondorioztatu dute [5].

Aipatutako ezaugarri hauekin, parametro optimoak zehaztu dira Inconel 718 hautsa forjaturiko oinarriaren gainean gehitzeko. Era berean, behin urrats hori eginda geruzak sortzeko orduan ondoz ondoko kordoiak bata bestearen gainean zenbat gainjarri zehaztu da. 5. irudiko (b) atalean ikus daitezkeen bezala,  $A_1 \approx A_2$  denean gainjartzea optimoa izango da; horrela, hurrengo geruza gehitzean, elkargunean biltzen den material gehigarriak ( $A_1$ ) azalera hutsa ( $A_2$ ) beteko du. Parametro honek, beste ezaugarri batzuen artean, geruza osatzeko beharrezkoa den kordoi kopurua zehazten du. Espero bezala, gainjartzea zenbat eta handiagoa izan, kordoi kopuru

handiagoa beharko da geruza bat osatzeko. Horretaz gain, parametro honen kordioen arteko loturaren kalitatean ere eragin zuzena dauka, kordioak zenbat eta gehiago gainjarri sendagoa izango delako haien arteko lotura. Gainera, gainjarpen-parametroak eragina dauka geruzaren altueran bai eta haren uniformetasunean ere. Esaterako, gainjartze handiagoekin geruza lodiagoak eta uniformeagoak lortzen dira. Hala ere, gainjartzea handiegia ( $A_1 \approx A_2$ ) denean, kordioen artean fusio-falten ondoriozko hutsuneak agertu daitezke, eta ondorioz, ezin daiteke nahi beste handitu parametro horren balioa.



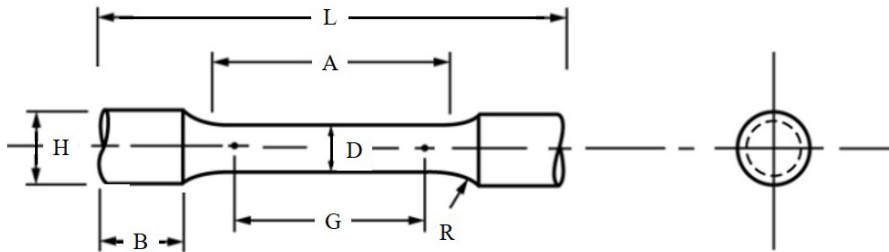
**5. irudia.** a) gainjartze gabeko egoera b) gainjartze optimoko egoera c) gainjartze handiko egoera.

Beraz, 6 kordioz osatutako lau geruza fabrikatu dira, gainjartze optimoa zehazteko kordoi bakuna gehitzeko erabili diren erreferentziazko parametro berak aplikatuta. Horrela, % 20, % 25, % 30 eta % 35eko gainjartzeak entseatu dira. Kasu honetan, gainjartze egokiena zehazteko, kontuan izan dira, geruzaren ezaugarri geometrikoen gain, fusio falten eta porositatearen ondoriozko akatsak.

Parametro optimoak eta gainjartze egokiena zehaztuta, eta trakzio-probeta fabrikatu aurretik, parametro hauek geruza anitzeko egoera baterako egokiak direla egiaztatzeke, kubo txiki bat eraiki da  $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$  dimentsioak dituen. Horrela, haren zeharkako sekzioa aztertuz, barnean fusio faltarik edo porositatearik ote dagoen aztertu da. Izan ere, garrantzitsua da akats hauek saihestea, propietate mekanikoetan duten eragin negatiboa dela eta. Hortaz, kubo hau sortzeko, prozesurako parametro optimoak eta gainjartze egokiena erabili dira. Era berean, berdina da trakzio-probeta gehitzeko erabiliko den estrategia. Hau da, alde batetik, geruzaren perimetroko kordioak bi geruzatik behin egin dira paretei euskarri-lana egin diezaioten. Bestetik, geruza bakoitzeko kordioak norabide berean gehitu dira, baina elkarren ondoko geruzen artean kordioak elkarzutak dira, bukaerako piezan ahalik eta propietate isotropoenak bermatzeko.

Amaitzeko, fabrikazio-prozesuen arteko lotura mekanikoa egokia den edo ez jakiteko, fabrikatu eta trakziara entseatu dira *ASTM E8/E8M-13a Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials* araudia-

ren araberako *Test Specimens with Gauge Length Four times the Diameter [E8]* motako *Specimen 4* probetak. Fabrikazio hau CNC bidezko tornu batean egin da Inconel 718 aleazioarentzat egokiak diren Sandvik Coromant «RCMT 08 03 M0-SM» kodedun plakatxoak erabiliz. Mekanizazio-prozesu honetan lehenengo probeta arbastatu da, trakzio-probetaren itxura hartu arte. Eta bukatzeko, akabera-pasadak egin zaizkio piezari azken mikrak doitzeko.



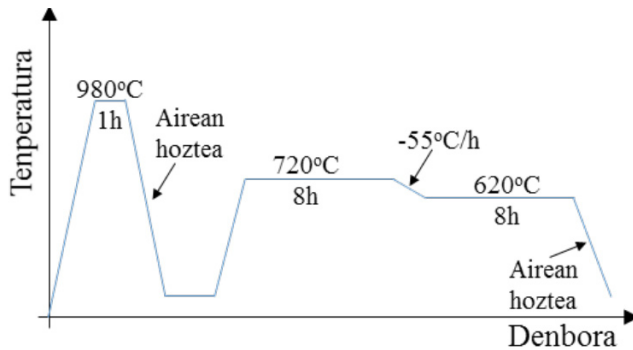
**6. irudia.** Erabilitako trakzio-probeta [6].

**1. taula.** Specimen 4-aren dimentsio normalizatuak [6].

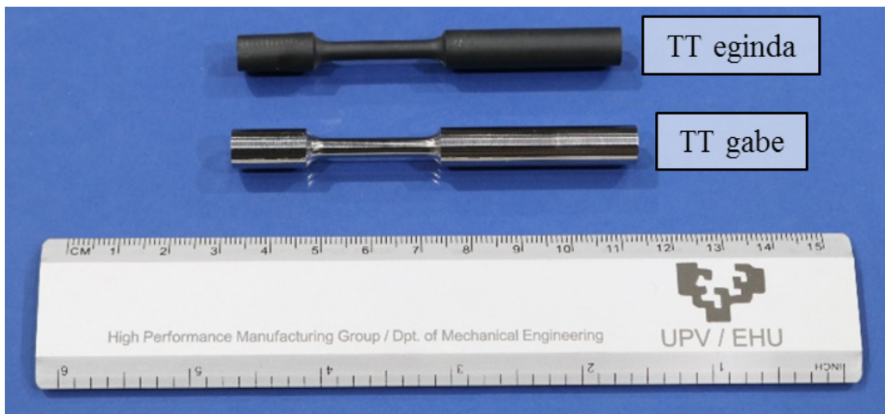
Dim. [mm]	Sp.4
G	16 ± 0,1
D	4 ± 0,1
R	4
A	20
B	15
H	8
L	±55

Horretarako, forjaturiko zilindro baten gainean Ø 10 mm eta 30 mm-ko altueradun zilindro bat gehitu da L-DED bidez, goian aipatu den estrategia jarraituz. Ondoren, araututako dimentsioak dituen probeta torneatu da, fabrikazio-prozesu bien arteko lotura probetaren diametro txikiko gunearen erdian kokatuta. Azkenik, Inconel 718 piezetan propietate mekanikoak hobetzeko maiz erabiltzen den eta 7. irudian ikus daitekeen prezipitazioko tratamendu termikoa (TT) aplikatu zaio probetari.

Bukatzeko, trakzio-saiakuntza burutu orduko, tratamendu termikoaren ondoriozko oxido-geruza kendu zaio lisaketa bidez, trakzio-saiakuntzako hausturaren sorreran eraginik izan ez dezan.



**7. irudia.** Aplikatutako tratamendu termikoa.



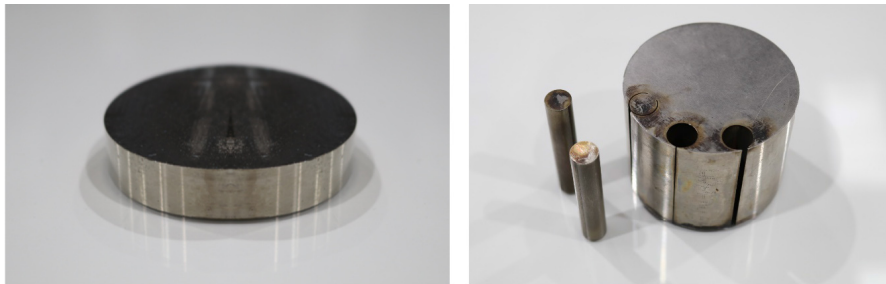
**8. irudia.** Tratamendu termikoa (TT) aplikatu ondorengo probetaren itxura.

### 3. MATERIALA ETA EKIPAMENDUA

#### 3.1. Materiala

Kordoi bakunak, gainjartzeak eta kuboak sortzeko, arteztutako aurpegiak dituzten  $\varnothing$  62 mm eta 10 mm-ko altuerako forjaturiko Inconel 718 disko formadun oinarriak erabili dira. Trakzio-probeta, berriz,  $\varnothing$  62 mm eta 50 mm-ko altuerako forjaturiko totxo batetik moztutako  $\varnothing$  10 mm-ko zilindro baten gainean gehitu da. Forjaturiko parte hauek 9. irudian ikus daitezke, eta haien konposizio kimikoa, berriz 2. taulan.





(a)

(b)

**9. irudia.** Erabilitako disko formadun oinarriak (a) eta trakzio-probeta lortzeko zilindroak (b).

**2. taula.** Inconel 718 aleazioaren konposizio kimikoa (% pisan) [7].

Ni	Cr	Fe	Mo	Nb & Ta	Co	Ti	Al	C
50-55	17-21	Bal.	2,8-3,0	4,8-5,5	1	0,65-1,15	0,20-0,80	≤0,08

L-DED bidez gehitzeko erabilitako hautsa, berriz, *Oerlikon Metco* etxeko *Metco Clad 718 Nickel-Base Alloy Powder* izan da. Hauts horren konposizio kimikoa 3. taulan bildutakoa da.

**3. taula.** Metco Clad 718 hautsaren konposizio kimikoa (% pisan) [8].

Ni	Cr	Mo	Fe	Nb & Ta	Ti	Mn	C	Si	Beste batzuk (max)
Bal.	19	3	18	5	1	0,08	0,05	0,20	<0,50

### 3.2. Ekipamendua

L-DED probak 5 askatasun-graduako zinematika eta  $700 \times 360 \times 380$  mm<sup>3</sup>-ko lan-eremua dituen laser-zentro kartesiarrean gauzatu dira. Erabilitako laserra, *Coherent* etxeko 1 kW-eko potentzia maximodun Yb:YAG *High Light Fiber Laser* egoera solidoko laserra izan da. Bestalde, erabili den hauts-elikatzailea *Sulzer Metco Twin 10-c* izan da, eta L-DED buruak pita ardazkide jarraitua dauka, laserra eta hautsa, biak, lan-gunera bideratzeko eta norabide orotan material-gehitzea ahalbidetzeko. Azkenik,

2X purutasuneko argon gasa erabili da hautsaren arrasterako eta prozesua-  
ren babeserako.

Zeharkako sekzioen azterketarako eta aintzat hartu beharreko ezauga-  
rrien neurketak egin ahal izateko, *Leica DCM3D* mikroskopia konfokala  
erabili da. Teknologia konfokala eta interferometria konbinatzen dituen  
ekipo hori gai da, dituen lenteekin, neurketak 0,1 nanometrorainoko bereiz-  
menaz eta abiadura handian egiteko, bai eta kuboan zeharkako sekzioen  
analisirako argazki anitzen batuketa automatikoa egiteko.

Bukatzeo, fabrikazio-prozesu bien arteko loturaren propietate me-  
kanikoak ezagutzeko gauzatu den trakzio-saiakuntza *Instron 8801* neke-  
probetarako makina serbohidraulikoan egin da. Ekipo horren ezaugarriak  
hurrengo 4. taulan bildu dira eta, saiakuntza honetarako, barailen artean  
3 mm/min-ko desplazamendu-abiadura erabili da.

**4. taula.** Instron 8801 neke-probetarako makina-  
ren ezaugarriak [9].

Ezaugarria	Balioa
Karga-ahalmena (kN)	$\pm 100$
Ibiltartea (mm)	150
Karga-zehaztasuna	Karga-ahalmenaren $\pm \% 0,002$

## 4. EMAITZAK

Atal honetan ikerlanean lorturiko emaitzarik garrantzitsuenak laburbil-  
tzen dira.

### 4.1. Kordoi bakunak

Kordoi bakunak moztu eta mikroskopiaan analizatu ostean, parame-  
tro sorta bakoitzarekin egindako kordoiatarako neurtu diren ezaugarriak eta  
kalkulatutako parametroak erakusten dira honako 5. taulan.

H/D forma-parametroarentzat eta diluzioarentzat lortu diren balioei  
erreparatuz, ikus daiteke kasu guztietan gomendatutako tarteen barruan ko-  
katzen direla ezaugarri bietan lortutako emaitzak eta, ondorioz, kordoi guz-  
tiak baliaagarriak direla ezaugarri horiei dagokienez. Hortaz, kordoi optimoa  
zehazteko, errendimendu handia izatea hobetsi da. Horrela, L-DED siste-  
man erabilitako optikaren *spot*-aren diametroa 1,5 mm denez, 1,5 mm-ko  
zabalera edo handiagoa duten kordoiak aukeratu dira. Ondorioz, irizpide  
hau 3, 6, 9, 10, 12, 15 eta 18. kordoiak soilik betetzen dute.

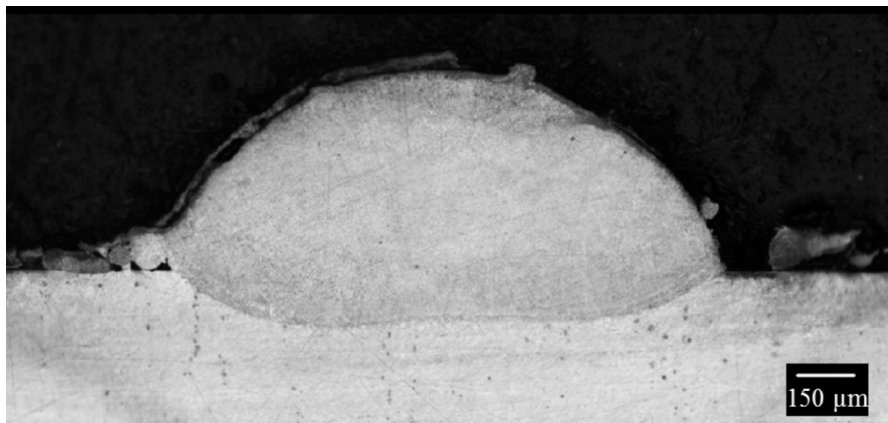
**5. taula.** Egin diren kordoiatarako lortutako emaitzak.

Kordoa	P (W)	F (mm/min)	Q (g/min)	H (mm)	D (mm)	B (mm)	H/D	Diluzioa (%)
1	500	500	5,5	0,356	1,219	0,073	0,292	17,02
2	550	500	5,5	0,409	1,397	0,067	0,292	14,00
3	600	500	5,5	0,422	1,518	0,103	0,278	19,54
4	500	525	5,5	0,400	1,303	0,075	0,307	15,79
5	550	525	5,5	0,391	1,428	0,069	0,274	15,02
6	600	525	5,5	0,423	1,682	0,138	0,251	24,62
7	500	550	5,5	0,390	1,481	0,109	0,263	21,84
8	550	550	5,5	0,389	1,399	0,100	0,276	20,47
9	600	550	5,5	0,374	1,729	0,147	0,216	28,17
10	500	500	6,0	0,425	1,503	0,065	0,283	13,27
11	550	500	6,0	0,440	1,397	0,080	0,315	15,32
12	600	500	6,0	0,468	1,523	0,076	0,307	13,97
13	500	525	6,0	0,418	1,460	0,077	0,286	15,47
14	550	525	6,0	0,450	1,488	0,080	0,302	15,03
15	600	525	6,0	0,456	1,519	0,102	0,300	18,28
16	500	550	6,0	0,412	1,342	0,105	0,307	20,33
17	550	550	6,0	0,420	1,425	0,091	0,295	17,81
18	600	550	6,0	0,424	1,542	0,112	0,275	20,84

Aipatutako azken horien artean, gomendatutako tartearen erdian kokatzen da 6. kordoiarentzat lortutako H/D balioa. Gainera, bestiek altuera antzekoa izan arren, 6. kordoiaren zabalera eta sakonera handienak dira, baita diluzioa ere. Zabalera handiena izateak geruza bat osatzeko kordoi kopuru txikiena behar izatea dakar eta, hortaz, prozesua burutzeko denbora laburragoa. Bestalde, sakonera eta diluzioa handia izateak, oinarriarekin edo aurreko geruzarekin lotura egokia bermatzea dakar. Horregatik, irizpide hauek guztiak kontuan hartuta eta guztien arteko oreka bilatuta, ondorioztatuta da 6. kordioan erabilitako parametroak direla egokienak.

**6. taula.** Prozesurako parametro optimoak.

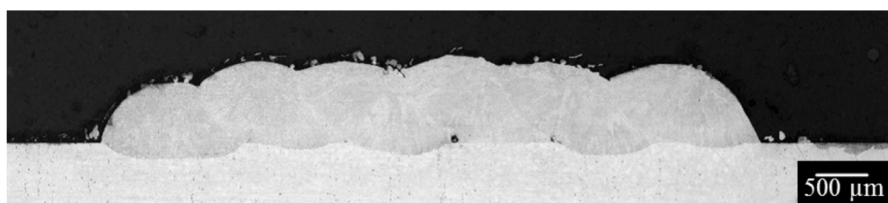
P (W)	F (mm/min)	Q (g/min)
600	525	5,5



**10. irudia.** Parametro optimoekin egindako kordoiaren zeharkako sekzioa.

#### 4.2. Gainjarpenaren analisisia

Kordoi bakuneko parametro optimoak erabiliz (6. taula), metodologiako atalean zehazturiko gainjarpenak entseatu dira. Zeharkako sekzioak aztertu ondoren (kasu bakoitzerako hiru), emaitzarik onena aztertutako gainjartzerik handienarekin lortu da; hau da, % 35eko gainjarpenarekin. Lortutako geruza guztien artean geruza uniformeena izan da ezaugarri geometrikoei dagokienez, bai altueran eta baita sakoneran ere. Gainera, beste geruzetan ez bezala, honetan fusio falta bakarra agertzen da kordoiaren artean; besteetan, ordea, hainbat daude.



**11. irudia.** % 35eko gainjartzearekin lortutako geruzaren zeharkako sekzioa.

#### 4.3. Kuboaren fabrikazioa

Behin kordoi bakuneko parametroen eta gainjarpenaren balio optimoa zehaztuta,  $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ -ko kuboak fabrikatu da. 12. irudian ikus daitezke azken saiakuntza hauek guztiak laburpen gisa.

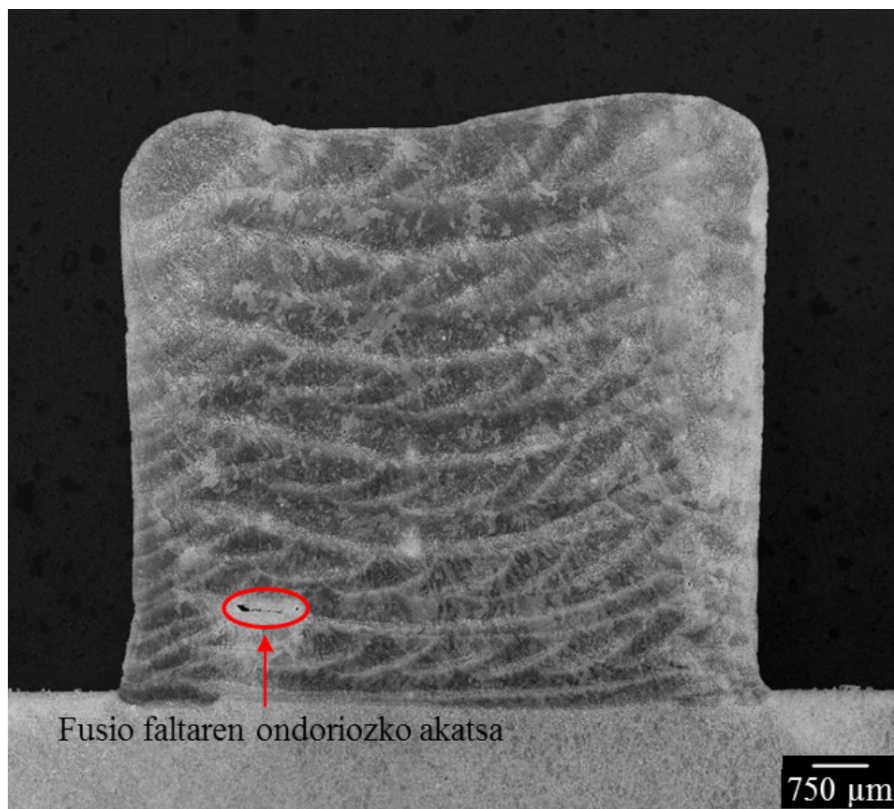


**12. irudia.** Fabrikaturiko kordoi, geruza eta kubo optimoak.

Ondoren, geruzaren prozedura bera jarraituta, kuboaren hiru zeharkako sekzio aztertu dira; ikusi 13. irudia. Mikroegitura behar bezala ikusteko, Kalling 2 errektibo kimikoarekin erasotu da materiala. 13. irudiko sekzioan, hasierako geruzetan fusio faltaren ondoriozko akats bat ageri da. Fusio falta horren arrazoiak zenbait izan daitezke; esaterako, laserraren potentzia baxuegia, laserraren aitzinapen-abiadura handiegia edo hauts-pilaketa bat. Hala ere, akats hori bakarra eta txikia da. Beraz, piezan zehar errepi-katzen ez denez, ausazko akastzat har daiteke. Izan ere, gainerako geruzei begiratuz gero, inolako porositaterik edo fusio faltarik agertzen ez dela ikusten da eta geruza guztietako kordoiaren gainjarpenak itxura ona duela ere nabari da.

Horrez gain, lehenengo geruzako kordoi guztien sakonera nahiko uniformea dela ikus daiteke. Horrek gehitutako kuboaren eta oinarriaren arteko lotura egokia izango den itxaropena ematen du.

Horiek horrela, emaitza honek baieztatu egiten du orain arte definitutako parametroak aproposak direla geruza anitzeko geometriak fabrikatzeko.

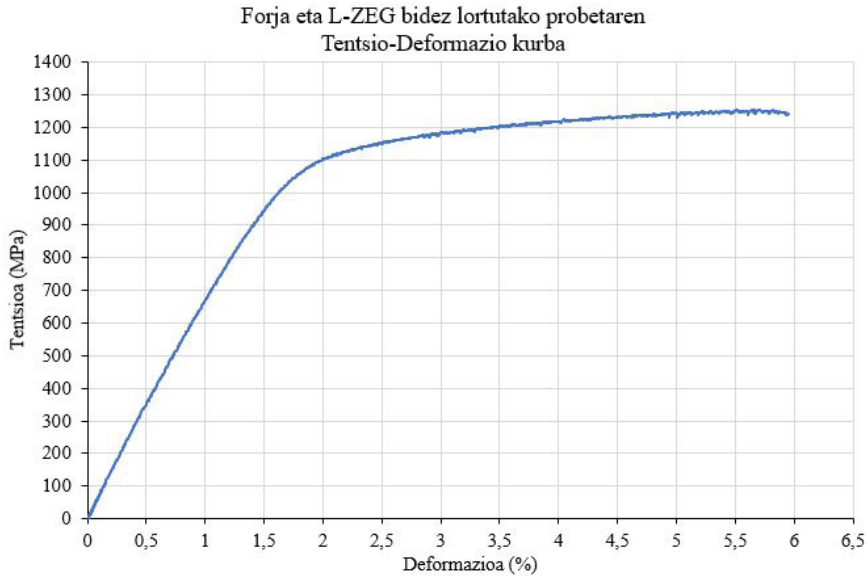


**13. irudia.** Kuboaren zeharkako sekzioa.

#### 4.4. Trakziozko saiakuntza

Forjaren eta FGaren arteko hibridazioaren karakterizazioa bukatzeko, ASTM E8 araudiaren arabeko trakzioko probetak fabrikatu eta entseatu dira. Trakzio-saiakuntzan honako Tentsio-Deformazio ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) grafikoa lortu da:

Probetak apurtu aurretik jasan duen tentsio maximoa ( $\sigma_R$ ) 1.255 MPa-ekoa izan da. Bestalde, grafikotik ateratako modulu elastikoa ( $E$ ) eta limite elastikoa ( $R_{p0,2}$ ), 73,5 GPa eta 1.050 MPa-ekoak dira, hurrenez hurren. Lortutako tentsio maximoa eta limite elastikoa zentuzkoak direla ondorioztatu da, bibliografian tratamendu termiko bera aplikatutako eta giro tenperaturan entseatutako Inconel 718arentzat  $\sigma_R = 1.335$  MPa eta  $R_{p0,2} = 1.110$  MPa inguruko balioak aurki daitezkeelako [10].



**14. irudia.** Tentsio-Deformazio grafikoa.

15. irudian, berriz, apurtutako probeta erakusten da. L-DED bidez gehitutako aldetik apurtu dela interpretatu da, eta ez fabrikazio-prozesu bien arteko lotura gunetik, zeina diametro txikiko gunearen erdian dagoen. Beraz, emaitza horrek fabrikazio-prozesu bien arteko lotura egokia dela adierazten du.



(a)

(b)

**15. irudia.** Apurtutako trakzio-probeta (a) eta haustura-sekzioa (b).

Bestalde, apurtutako probetaren zeharkako sekzioari erreparatzen bazaio, nahiko zuzenak diren marka batzuk hauteman daitezke. Marka horiek, kordioen arteko loturarekin bat etortzeaz gain, probetaren hausturaren

hasiera-arrazoia dira. Halakorik gerta ez dadin eta bi fabrikazio-prozesuen hibridazioa optimizatze aldera, erabaki da hurrengo probetei *Hot Isostatic Pressing (HIP)* tratamendu bat aplikatzea oso interesgarria litzatekeela. HIP tratamenduaren helburu nagusia, piezen dentsitatea handituz, barneko porositatea murriztea edo desagerraraztea da. Horretarako, porositatea duten piezei sinterizazio-prozesu hau egiten zaie ingurumen kontrolatu batean; hots, 100-200 MPa eta 900-1.250 °C tarteko baldintzapean.

## 5. ONDORIOAK

Lan honen helburua izan da fabrikazio gehigarriaren eta forjaren hibridazioa aztertzea, sektore aeronautikorako Inconel 718 piezen fabrikazio eraginkorra lortzeko. Saiakuntzetatik honako ondorio nagusiak atera dira:

- Forjaturiko Inconel 718 oinarriaren gainean L-DED bidez material bereko hautsa gehitzeko erabili beharreko parametro optimoak 600 W-eko potentzia, 525 mm · min<sup>-1</sup>-eko aitzinamendu abiadura eta 5,5 g · min<sup>-1</sup>-eko hauts-emia dira.
- Ezaugarri horiekin batera, geruza sortzeko orduan kordoen artean erabili beharreko gainjartzea % 35koa dela ikusi da.
- Trakzio-saiakuntzan probetaren hutsegitea L-DED bidez gehitutako aldean gertatu da, 1.255 MPa-eko tentsio maximoan. Emaitza horrekin, ondorioztatu da hibridaturiko prozesu bien arteko lotura egokia dela, eta mekanikoki bi prozesuen artean ahulena FGa dela.
- Eskuraturiko emaitzak azertu ostean, propietate mekanikoak hobetze aldera erabaki da oso interesgarria izan daitekeela, prezipitazio tratamendu termikoa aplikatzeaz gain, forja eta L-DED bidez gehitutako osagaiei *Hot Isostatic Pressing* tratamendua aplikatzea. Beraz, etorkizunean ildo honetako ikerkuntzak jarraipena izango du.

## ESKER ONA

Ikerlan hau Eusko Jaurlaritzaren Ekonomia garapen, Jasangarritasun eta Ingurumen Sailak finantzaturiko IMAGINE proiektuaren (Elkartek KK-2021/00120) baitan garatu da. Era berean, eskerrak eman nahi zaizkio Zientzia eta Berrikuntza Ministerioari, I+G+B motako ALASURF - PID2019-109220RB-I00 proiektuaren finantzaketatik.

Bestalde, Eusko Jaurlaritzaren Hezkuntza Sailaren doktoreak ez diren ikertzaileak prestatzeko Doktoretza Aurreko Programaren laguntza eskertzen da jasotako diru-laguntzarengatik.



## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] LAMIKIZ, A. Industrial Laser Applications. Metal Additive Manufacturing.
- [2] BLAKEY-MILNER, B., GRADL, P., SNEDDEN, G., BROOKS, M., PITOT, J., LOPEZ, E., LEARY, M., BERTO, F. eta DU PLESSIS, A. 2021. «Metal additive manufacturing in aerospace: A review»; *Materials & Design* **209** (2021) 110008 <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>.
- [3] ARRIZUBIETA, J.I., LAMIKIZ, A., UKAR, E. eta ORTEGA, N. 2019. «Laser bizko prozesu gehigarrietarako hauts-elikagailuen azterketa eta kalibrazioa»; *Ekaia*, **36**, 2019, 275-290. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.20749>).
- [4] UHLMANN, E., DÜCHTING, J., PETRAT, T., KROHMER, E., GRAF, B. eta RETHMEIER, M. 2021. «Effects on the distortion of Inconel 718 components along a hybrid laser-based additive manufacturing process chain using laser powder bed fusion and laser metal deposition» *Prog Addit Manuf* **6**, 385-394 (2021). <https://doi.org/10.1007/s40964-021-00171-9>.
- [5] DALAEE, M., CERRUTTI, E., DEY, I., LEINENBACH, C. eta WEGENE, K. 2022. «Parameters Development for Optimum Deposition Rate in Laser DMD of Stainless Steel EN X3CrNiMo13-4», *Lasers Manuf. Mater. Process.* **9**, 1-17 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40516-021-00161-3>.
- [6] «ASTM E8/E8M – 13a Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials 1», doi: 10.1520/E0008\_E0008M-13A.
- [7] D.-H. KIM, J.-H. KIM, J.-W. SA, Y.-S. LEE, C.-K. PARK eta S.-I. MOON, «Stress rupture characteristics of Inconel 718 alloy for ramjet combustor», *Materials Science and Engineering A*, **483-484** (2008) 262-265.
- [8] Oerlikon Metco. Material Product Data Sheet: Nickel-Based Superalloy Powder and Wires. [https://www.oerlikon.com/ecoma/files/DSM-0251.3\\_Ni\\_Superalloys.pdf](https://www.oerlikon.com/ecoma/files/DSM-0251.3_Ni_Superalloys.pdf) helbidetik eskuratua (azken sarrera: 2022ko ekaina).
- [9] CORTINA, M., ARRIZUBIETA, J.I., RUIZ, J.E. eta LAMIKIZ, A. 2020. «Thermomechanical analysis of additively manufactured bimetallic tools for hot stamping» *Journal of Manufacturing Processes* **57** (2020) 905-918 <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.07.036>.
- [10] VAKILI-TAHAMI, F. eta REZA ADIBEIG, M. «Investigating the possibility of replacing IN 738LC gas turbine blades with IN 718.» *Journal of Mechanical Science and Technology* **29** (10) (2015) 4167-4178 DOI 10.1007/s12206-015-0911-6.

