

Egituraturiko argiaren aplikazioak fabrikazio hibridoaren bidez pieza metalikoak ekoizteko

Applications of structured light technology for the production of metallic parts by means of hybrid manufacturing

Amaia Alberdi*, Nerea Alberdi, Rakel Pacheco, Mikel Ortiz, Pedro Ramiro

Tecnalia R&I

LABURPENA: Fabrikazio gehigarria eta mekanizatua makina berean elkartzen dituzten makina hibridoaren kontzeptu berriaren garapenarekin, piezen konponketa eta propietate bereziak dituzten estalduren fabrikazioa bezalako aplikazioak automatizatzeko aukerak sortzen ari dira. Aplikazio hauetan, agerian geratu da neurketa sistemen beharra piezen geometria ezagutzeko. Neurketa sistema ezberdinen artean, egituraturiko argiak abantaila ugari aurkezten ditu prozesu honetan aplikatzeko: tamaina ezberdinetako piezak neurtzeko gai da, pieza osoa neurketa bakar batean egin dezake, testura gutxi duten edota testurarik ez duten objektuak neurtzeko gai da, eta gainera, argiztapen baldintzen aldaketek ez diote apenas eragiten. Artikulu honetan, egituraturiko argiaren aplikazio ezberdinak azaltzen dira, fabrikazio hibridorako. Honez gain, teknologia honen aplikazioaren adibide bat ere deskribatzen da, berotako estanzazioan erabiltzen den tako baten estalduraren fabrikazioan datzana, hain zuzen ere. Horretarako, Ibarria fabrikatzailearen ZVH 45/1600 Add+Process makina hibridoa erabili da.

HITZ GAKOAK: fabrikazio hibridoa, fabrikazio gehigarria, LMD, egituraturiko argia, sistema optikoak.

ABSTRACT: With the development of the new concept of hybrid machine, which combines additive and subtractive manufacturing in the same machine, new opportunities for automation of applications such as the repairing of defective parts or the addition of coatings with specific properties are coming out. In these applications, the need for the use of measuring systems has been revealed, in order to know the actual geometry of the parts. Among the different measurement systems, the structured light technology presents many advantages for this process: it is capable of measuring parts of different sizes and with low texture in a single measurement, and additionally, the lighting conditions barely affect to the measurement. In this article, different applications of structured light technology for hybrid manufacturing are presented. In addition, an example of the application of this technology is also described, which consists in the manufacturing of the coating of a hot stamping die. For this, the ZVH 45/1600 Add+Process hybrid machine from Ibarria manufacturer has been employed.

KEYWORDS: Hybrid manufacturing, Additive Manufacturing, LMD, Structured Light, optical systems.

* **Harremanetan jartzeko / Corresponding author:** Amaia Alberdi. Tecnalia Research & Innovation. Ekoizpen Aurreraturako Saila. Mikeletegi Pasealekua 7. Gipuzkoako Parke zientifiko eta teknologikoa. 20009 Donostia. Euskal Herria. – amaia.alberdi@tecnalia.com – <https://orcid.org/0000-0003-2225-993X>.

Nola aipatu / How to cite: Alberdi, Amaia; Alberdi, Nerea; Pacheco, Rakel; Ortiz, Mikel; Ramiro, Pedro (2019). «Egituraturiko argiaren aplikazioak fabrikazio hibridoaren bidez pieza metalikoak ekoizteko»; *Ekaia*, ale berezia 2019, 31-44. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.19829>).

Jasoa: 28 maiatza, 2018; Onartua: 26 uztaila, 2018.

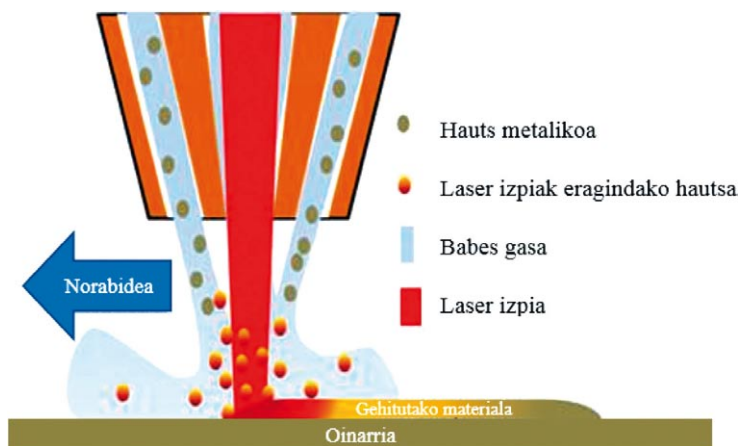
ISSN 0214-9001 - eISSN 2444-3255 / © 2019 UPV/EHU



Obra hau Creative Commons Atribución 4.0 Internacional-en lizentziapean dago

1. SARRERA

Laser bidezko material gehiketa, *Laser Cladding*, *Direct Laser Deposition* edo *Laser Metal Deposition* (LMD) izenez ere ezaguna, akaberako piezak sortzeko erabiltzen den fabrikazio gehigarrien prozesu bat da, material metalikoetan aplikatzen dena. Prozesu hau, laser izpi baten bidez, oinarria edo substratua den materiala urtzean datza, eta sortzen den bainu urtu edo *melt-pool*-ean, hauts edo hari eran nahi den materiala gehitzen da (1. irudia). Horrela, oinarri eta gehitutako materialaren artean kalitate altuko lotura sortzen da. Material gehiketa geruzaz geruza egiten denez soldadura kordoiak gainjarriz, nahi den geometriako pieza sor daiteke laser izpiaren ibilbidea definituz. Horrela, prozesu honek aplikazio ezberdinetarako balio du: 3D piezak sortzeko, pieza batean geometria konplexua duten zonak eraikitzeko, pieza batean kaltetuta dagoen gunea konpontzeko edota oinarriarekin konparatuz material ezberdina duen eta propietate bereziak dauzkan estaldura bat sortzeko.



1. irudia. LMD prozesuaren eskema.

Aplikazio hauek guztiek, normalean, txirbil-harroketa bidezko mekanizazio etapa bat behar izaten dute, LMD bidez gehituriko materialaren akabera eta kalitatea ez delako nahikoa izaten. Gainera, prozesu hau, robot edota makina-erreminta handietan integra daiteke. Hori dela eta, gaur egun, mundu osoko makina-erreminten ekoizle nagusiak makina hibrido izenez ezagutzen diren makinak eskaintzen ari dira, hau da, LMD bidezko fabrikazio gehigarria eta mekanizazioa makina berean egiteko gai diren makinak [1]. Hala ere, lehen makina hibridoaren kontzeptua 2013ko abenduan aurkeztu zen Euromold ferian, DMG MORI fabrikatzailearen eskutik [2]. Orduz goerotik, MAZAK, WFL edota OKUMA fa-

brikatzaileak, adibidez, LMD teknologia eta mekanizatu batzen dituzten makina hibridoak aurkeztu dituzte. IBARMIA euskal fabrikatzaileak ere, lan honetarako erabili den ZVH45/1600 Add+Process makina hibridoa 2015eko irailean Milanen egin zen EMO ferian aurkeztu zuen lehen aldiz [3], orain Tecnaliako instalazioetan erabilgarri dagoena. Beraz, teknologia hibrido hau nahiko berria denez, oraindik erronka konplexuak dauzka gainditzeko.

Erronka hauetako bat LMD prozesu bidez sorturiko piezaren geometria ezagutzean datza. Izan ere, LMD bidez eraikitako pieza, CAD (*Computer Aided Design*) programan diseinaturiko hiru dimentsioko (3D) eredu teorikoen aldean desberdina da. Prozesu-ereduek piezaren geometria aurreikusteko aukera ematen duten arren, eremu termikoak sortutako deformazioak edota prozesuan zehar parametroren batean gerta daitezkeen aldaketak (aitzinen abiadura, adibidez) direla eta, geometria simulatuaren eta geometria errearen arteko desberdintasunak sor daitezke. Horrela, oso garrantzitsua da LMD bidez gehitutako materialaren geometria erreala neurtzea, bai geometria ikuskatzeko edota akaberako mekanizatuaren ibilbideak programatzeko ere. 3D-ko sistema optikoak, azaleraren hiru dimentsioko datuak biltzen dituzten sistemak izanik, erronka honi erantzuteko gai izan daitezke [4, 5], eta egituraturiko argia sistema optiko horietako bat da.

Artikulu honetan, egituraturiko argiaren erabilgarritasun ezberdinak azaltzen dira, fabrikazio hibridoaren aplikazio ezberdinetarako erabilgarritasunak. Adibide gisa, berotako estanzio tango baten estalduraren fabrikazio hibridoa aurkezten da, non teknologia hau erabili den hasierako piezaren eredu digitala eraikitzeke, pieza hau makinan kokatzeko eta azkenik, sortutako estalduraren lodiera kalkulatzeko.

2. EGITURATURIKO ARGIAN OINARRITURIKO TEKNOLOGIA

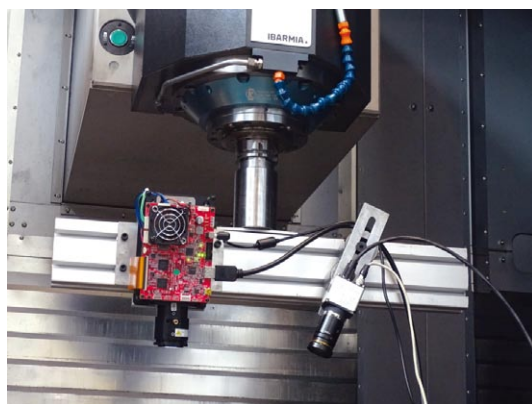
Egituraturiko argia 3D eran gainazalak neurtzeko metodo bat da, triangulazioan oinarritzen dena. Neurtu nahi den objektu edo azalera, led proiektore batekin argizatzen da argi marrak (kodetutako eredu binarioak) erabiliz, eta sorturiko irudia kamera baten bidez jasotzen da. Objektuaren 3D forma, jasotako irudian argi marren distortsioa neurtuz kalkulatu da.

Praktikan, gehien erabiltzen den pertzepzio-sistema *touch-probe* edo ukipen-zundak dira. Hauek, neurtu behar den gainazalaren ondoan kokatu, eta gainazal honetako puntu batekin kontaktua egin arte mugitzen dira, puntu horren kokalekua kalkulatu. Prozesu hau behin eta berriz errepikatzen da neurtu behar den gainazaleko puntu ezberdinetan, piezaren geometria osoa era zehatzean eraikitzen delarik. Beraz, geometria konple-

xuko piezak neurtzeko, puntu asko neurtu behar dira pieza hauen sakabanatze-diagrama trinko bat eraikitzeko, eta luze joko lukete neurketa sistema hauek. Hain zuzen ere, egituraturiko argian oinarrituriko sistemen abantailatako bat, neurketa bakar batean objektu edo azalera osoa berreraikitzeko duten gaitasuna da, sakabanatze-diagrama trinko bat eraikiz eskaneatze-prozesuaren beharrik gabe. Honez gain, beste 3D berreraikitze metodoak ez bezala, teknologia hau testura gutxi duten edota testurarik ez duten objektuak neurtzeko gai da, eta gainera, argiztapen baldintzen aldaketak ez diote apenas eragiten.

Era honetako sistemen ekoizle ezberdinak daude, zeinak sakabanatze-diagramak sortzen dituzten soluzio itxiak eskaintzen dituzten, eta tamaina ezberdinetako piezekin eta distantzia eta bereizmen ezberdinekin lan egiteko prest dauden [6-8]. PhoXi de Photoneo [9] eskanerrak, bestalde, hainbat tamainatako piezekin eta distantziekin lan egiteko eskanerren konfigurazio ezberdinak eskaintzeaz gain, API (*Advanced Programming Interface*) ireki bat ere eskaintzen du, sakabanatze diagramen tratamendurako software ezberdinekin lan egin ahal izateko.

Lan honetarako erabili diren led proiektorea eta kamera TI (Texas Instruments) eta uEye UI-3360CP markakoak dira, hurrenez hurren (2. irudia), DAVID SL softwarearekin batera. Kamera eta led proiektore hauekin, tamaina diferenteko piezak neur daitezke hainbat bereizmenekin, beren artean distantzia eta angelu ezberdinak erabiliz.

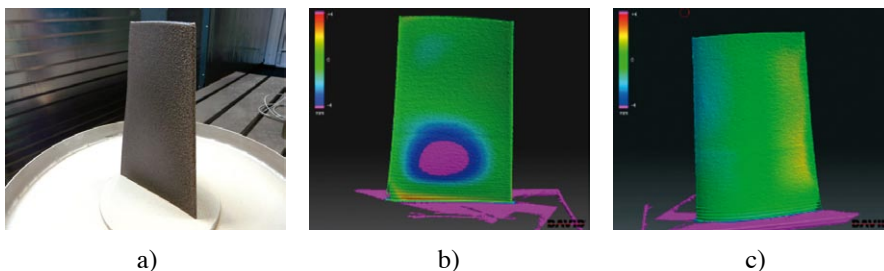


2. irudia. Led Proiektorea eta kamera.

Fabrikazio gehigarriaren kasuan, teknologia hau honako aplikazio hauetarako erabil daiteke: i) Eraikitako piezaren geometria ikuskatzeko, ii) akatsak antzeman eta lokalizatzeke, eta iii) jatorrizko piezaren eredu digitalak sortzeko.

2.1. Eraikitako piezaren geometriaren ikuskapena

Fabrikazio gehigarriaren kasuan, LMD bidez eraikitako piezaren egiazko geometria ez da ezagutzen. Egituraturiko argiak, sortutako piezaren geometria neurtu eta piezaren 3D diseinu teorikoarekin (CADarekin) alderatzeko balio dezake, desbideraketak identifikatuz (3. irudia). Desbideraketa hauek material gehiago gehituz edota txirbil-harroketa bidezko mekanizatuaren bidez materiala kenduz zuzendu daitezke.



3. irudia. LMD bidez eraikitako turbina beso baten geometriaren ikuskapena: a) eraikitako pieza; b) eta c) egituraturiko argiaren bidez neurtutako piezaren eta diseinatutako piezaren (CADaren) arteko alderaketa

2.2. Akatsen antzematea eta lokalizazioa

Konponketa aplikazioetan, jatorrizko piezan akatsak antzeman eta lokalizatzea oso garrantzitsua da, materiala akatsa dagoen posizioan gehitzeko. Egituraturiko argiaren bidez, pieza neurtu eta piezaren eredu batekin alderatuz, akatsak dauden ala ez identifika daiteke. Gainera, akatsik egonez gero, piezaren zer posiziotan dagoen ere zehaztu daiteke. Teknologia honen zehaztasun-maila erabilpen-baldintzen arabera da; Hona zehaztasun-maila hau baldintzatzen duten ezaugarri nagusiak: i) kameraren eta piezaren arteko distantzia; ii) sortutako 3D azaleraren tamaina; eta iii) kameraren bereizmenak. Adibide gisa, 240 mm-ko luzerako pieza baten kasuan, metro bateko distantziara neurtuz gero, teknologia hau 0,3 mm-ko tamainako akatsak identifikatzeko gai da.

2.3. Eredu digitalen eraikuntza

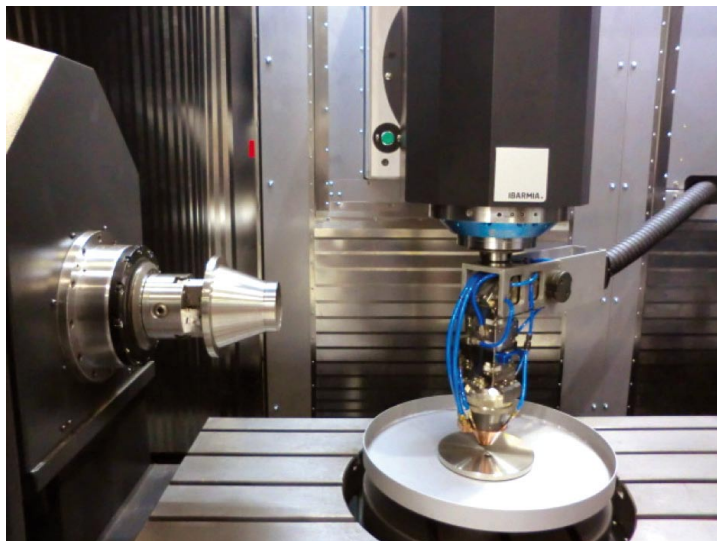
Fabrikazio gehigarriaren aplikazio batzuetan, oinarriaren geometria ez da ezagutzen. Adibidez, molde eta matrizeen fabrikazioaren kasuan, hauen diseinua askotan alda daiteke, eta, beraz, ohikoena jatorrizko piezaren geometria edo CADa ezaguna ez izatea da. Pieza hauetan fabri-

kazio gehigarriaren bidez materiala gehitu nahi bada, aldaketa edo konponketa bat egiteko edota propietate bereziko estaldura bat sortzeko, eskuz egin ohi da. Prozesu hau era automatikoa egiteko, beharrezkoa da piezaren geometria ezagutzea, LMD prozesuaren ibilbideak programatzeko. Egituraturiko argiaren bidez, jatorrizko piezaren 3D eredu digitalak eraiki daitezke, eredu hauek CAM (*Computer Aided Manufacturing*) softwarean inportatuz, non makinaren edo robotaren ibilbideak programatzen diren.

3. IBARMIA ZVH ADD+PROCESS MAKINA HIBRIDOA

Lan honetan erabili den makina hibridoa Ibarria fabrikatzailearen ZVH45/1600 Add+Process makina da (4. irudia). Mahai finkoa eta zutabe mugikorra duen prozesu-anitzeko makina honek LMDan oinarrituriko fabrikazio gehigarria, 5 ardatzetako fresaketa eta torneaketa (horizontala eta bertikala) elkartzen ditu makina berean.

LMD prozesuari dagokionez, makina hau Precitec YC52 buruarekin, Sulzer Metco TWIN-10-C hauts-banatzailearekin eta $1,07\ \mu\text{m}$ -ko uhin-luzera eta 3 kW-ko potentzia duen Rofin FL030 fibrazko laser-sorgailuarekin dago hornitua (laser-sorgailu honek modu jarraituan nahiz pultsatuan egin dezake lana).



4. irudia. Ibarriaren ZVH45/1600 Add+Process makina hibridoa.

4. BEROTAKO ESTANPAZIOKO TAKO BATEN ESTALDURAREN FABRIKAZIO HIBRIDOA

Berotako estanzazioan erabiltzen diren moldeek esfortzu termo-mekaniko handiak jasaten dituzte inpaktuen eta neke termikoaren ondorioz. Moldeak esfortzu horiek jasateko diseinatuta egon arren, zona guztiek ez dituzte esfortzu berdinak jasaten, eta, beraz, ziklo jakin batzuen ostean pitzadurak sortu ohi dira moldeen zona kritikoetan.

LMD prozesuak, oinarriaren aldean ezberdina den materiala gehitzea ahalbidetzen du. Beraz, estanzaziorako moldeen kasuan, zona kritikoetan propietate bereziak dituzten estaldurak eraikitzea ahalbidetzen du prozesu honek, moldeen balio-bizitza luzatuz.

Lan honetan, automozio industriarako berotako estanzazio-prozesuan erabiltzen den tako baten estaldura eraiki da artikulu honetan zehar deskribatu diren kontzeptuak aplikatuz, hau da, fabrikazio hibridoa (LMD +mekanizatua) eta egituraturiko argiaren bidezko neurketa.

4.1. Materialak

Aplikazio honetarako erabili diren materialak, estanzazioaren industria erabili ohi diren materialak dira. Kasu honetan, oinarriaren materiala, hau da, jatorrizko takoaren materiala, tenplatutako Uddeholm QRO 90 altzairua da, Kromo-Molibdeno-Vanadiozko aleazio bat.

Bestalde, proba esperimentalak egiteko, oinarritzat 1.2344 altzairuko plakak erabili dira, H13 izenez ezaguna dena eta aplikazio hauetan ohikoa dena, tenperatura altuetan mantentzen dituen gogortasuna eta haustura-erresistentzia propietateei esker.

Azkenik, estaldura sortzeko erabili den hautsa zementaziorako AISI 8620 (1.6523) altzairua izan da, 45 eta 125 μm tamaina tarteko partikulekin. Aleazio honek gainazaleko gogortasun handia eta material muinean zailtasun handia eskaintzen du.

Material hauen guztien propietateak 1. taulan adierazten dira.

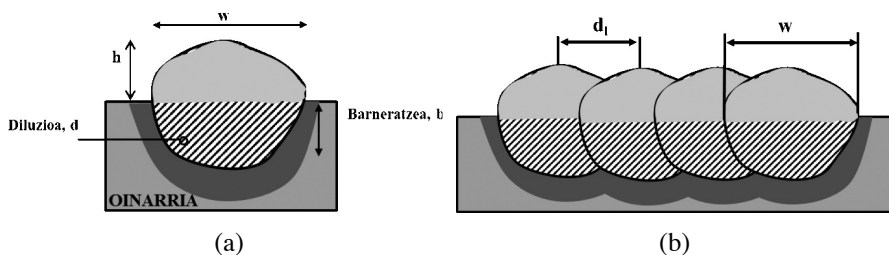
1. taula. Erabili diren altzairuen konposizio kimikoa (%)

Altzairua	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	Fe
QRO 90	0,38	0,30	0,75	2,6	2,25	—	0,9	Bal.
H13	0,40	1,00	0,40	5,3	1,40	—	1,0	Bal.
AISI 8620	0,20	0,25	0,80	0,5	0,20	0,55	—	Bal.

4.2. LMD prozesuaren parametroen definizioa

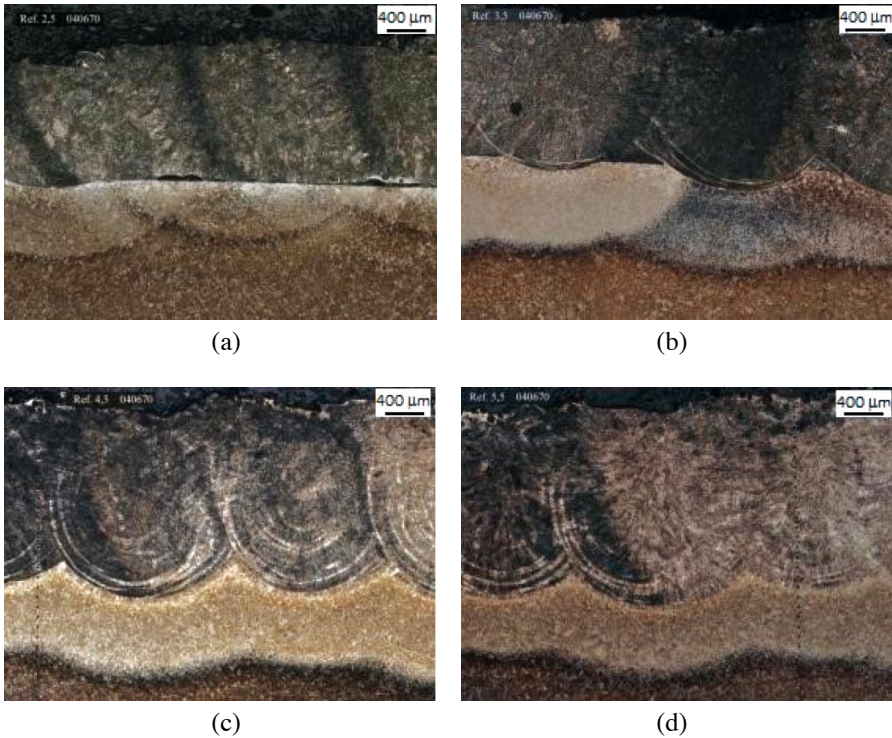
Estaldura sortzeko lehenengo pausoa, LMD prozesuan erabili beharreko parametroen balio egokiak saiakuntza esperimentalen bitartez aurkitzea izan da.

Horretarako, LMD prozesuaren parametro garrantzitsuenen baloreak aldatuz, hau da, laserraren potentzia (P) eta laser buruaren aitzinapen abiadura (v_f) aldatuz, saiakuntza ezberdinak egin dira. Saiakuntza hauek, laserraren potentzia 500 eta 2500 W artean, eta aitzinapen abiadura 50 eta 750 mm/min artean aldatu dira, haien arteko P/v_f erlazioa 3,33an mantenduz eta guztira bost kondizio ezberdin probatuz. Hauts-fluxua (\dot{m}_p) 20 g/min-koa eta laserraren spot diametroa 2 mm-koa izan dira saiakuntza guztietan. Bost kondizio ezberdin hauek erabiliz, lehenengo, banakako kordoiak fabrikatu dira oinarritzat H13 materiala erabiliz. Honek, kondizio ezberdinak erabiliz lortzen den kordoiaren geometria karakterizatzea ahalbidetu du, hau da, banakako kordoiaren altuera (h) eta zabalera (w) ezagutzeko (5-a irudia). Banakako kordoiak fabrikatu ondoren, gainjarritako kordoiak fabrikatu dira, aldameneko kordoiaren artean % 50eko gainjartzea aplikatuz. Aldameneko kordoiaren arteko gainjartzea, haien arteko distantziaren (d_l) eta banakako kordoiaren zabalaren (w) arteko erlazioa da (5-b irudia).



5. irudia. (a) Banakako kordoiaren karakterizazioa; (b) Kordoi gainjarrien eskema.

Potentzia baxuenarekin egindako saiakuntzan (500 W-ko potentzia), ez da loturarik lortu oinarriaren eta gehitutako materialaren artean. Gainerako kondizioekin fabrikatutako estalduren kalitatea konprobatzeko, saiakuntza guztien zeharkako ebaketa egin da eta mikroskopia optikoan behatu dira. 6. irudian ikus daitekeen moduan, potentzia baxuenekin oso diluzio baxua lortzen da oinarriaren eta gehitutako materialaren artean.



6. irudia. Potentzia eta abiadura ezberdinekin sortutako estalduren mikrografiak: (a) $P = 1.000 \text{ W}$ eta $v_f = 300 \text{ mm/min}$; (b) $P = 1.500 \text{ W}$ eta $v_f = 450 \text{ mm/min}$; (c) $P = 2000 \text{ W}$ eta $v_f = 600 \text{ mm/min}$; (d) $P = 2.500 \text{ W}$ eta $v_f = 750 \text{ mm/min}$.

Mikroskopia optikoarekin egindako behaketaz gainera, kondizio baikoitzarekin lortzen diren emaitzak aztertu dira, honako ezaugarriei dagokienez: estalduraren lodiera (H), hautsaren efizientzia (η , estalduran gehitutako hauts kantitatea eta erabilitako hautsaren arteko erlazioa), material gehiketaren abiadura (MDR , *Material Deposition Rate*) eta produktibitatea (minutu batean estaltzen den azalera kantitatea). Estalduraren lodiera, irudiak tratatzeko balio duen Clemex Captiva® softwarearekin neurtu da. Honez gain, estalduraren zeharkako azalera (A) ere neurtu da. Bestalde, material gehiketaren abiadura, hautsaren efizientzia eta produktibitatea honako ekuazio hauen bidez kalkulatu dira, non Q hautsaren dentsitatea den:

$$MDR = A \cdot v_f \cdot \rho \quad (1)$$

$$\eta = \frac{MDR}{\dot{m}_p} \quad (2)$$

$$\text{Produktibitatea} = (1 - \text{gainjartzea} \cdot w \cdot v_f) \quad (3)$$

Lorturiko emaitzak 2. taulan adierazten dira.

2. taula. Estaldura fabrikatzeko kondizio optimoen emaitzak

P [W]	v_f [mm/min]	\dot{m}_p [g/min]	H [mm]	η [%]	MDR [kg/h]	Produktibitatea [mm ² /min]
1000	300	20	1,6	37,57	0,44	525,0
1500	450	20	1,4	49,32	0,58	787,5
2000	600	20	1,3	59,19	0,70	990,0
2500	750	20	1,1	60,96	0,72	1.200,0

Analisi honen bidez, ondoriozta daiteke material hauekin estaldura bat sortzeko gutxienez 2.000 W-ko potentzia erabili behar dela, zeren eta, laser potentzia baxuagoak erabiliz gero, gehitutako materialaren eta oinarriaren arteko diluzioa oso baxua baita. Beste aukera bat potentzia baxuenekin abiadura jaistea izan daiteke, diluzioa handitzeko asmoz, baina kasu horretan, produktibitatea asko jaitsiko litzateke.

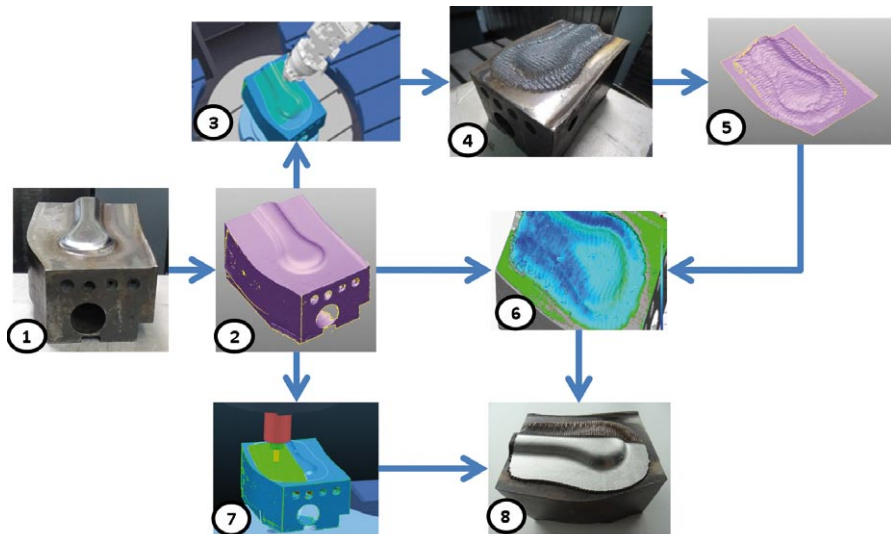
4.3. Estalduraren fabrikazioa

Aurreko pausoan eginiko saiakuntza esperimentalak, takoaren estaldura fabrikatzeko erabili beharreko parametroak definitzea ahalbidetu du. Horrela, estaldura fabrikatzeko erabili diren kondizioak hauek izan dira: 2.000 W-ko laser potentzia modu jarraituan, 600 mm/min-ko aitzinapen abiadura, 20 g/min-ko hauts fluxua eta 2 mm-ko laser spota. Gainera, helburutzat mekanizatu ondoren estalduren lodiera 2 mm-koa izatea denez, beharrezkoa izan da LMD prozesuaren bidez 2 geruza gehitzea.

Estaldura eraikitzeke jarraituriko metodologia hau izan da (7. irudia): lehenik eta behin, estanzazio takoaren geometria (1) ezaguna ez zenez, egituraturiko argiaren bidez neurtu eta takoaren 3D eredu digitala eraiki da (2). Honez gain, pieza makinaren koordenatuetan ere kokatu da. Neurketa hau egiteko 5 segundo behar izan dira. Sortutako takoaren sakabana-tze-diagrama, *.stl* formatua duen gainazal batean gorde da. Eredu digital hau (*.stl* artxiboa), PowerMill® CAM softwarean inportatu da, eta LMD prozesuaren oinarritzat hartu da. Honez gain, oinarri honen gainazalean, aplikazio honetarako adierazgarria den area espezifikoko bat definitu da, estaldura geometria honekin eraikitzeke. Horretarako, area espezifikoko honen geometriaren barruan zig-zag moduan LMD ibilbideak programatu dira 5 ardatzetan, «raster» izeneko estrategia mota erabiliz (3).

Ibilbide hauek gainera, oinarriaren eta LMD buruaren artean perpendikularitasuna mantenduz eta saiakuntza esperimentaletan erabili den kordoi gainjarrien arteko distantzia berdina erabiliz programatu dira. Ondoren, takoaren estaldura fabrikatzeko, CAM softwarean sortutako pieza-programa makina hibridoan erabili da, saiakuntza esperimentalen bidez definituriko parametroen balioak erabiliz laserraren potentziari, aitzinapen abiadurari eta hauts fluxuari dagokienez (4). Gainera, egituraturiko argiarekin egindako neurketari esker piezaren kokalekua (makinaren koordenatuetan) ezaguna izan denez, pieza-programa honen erreferentziak era errazean kalkulatu ahal izan dira. Programa hau 2 aldiz erabili da bien artean 1,3 mm-tako offseta aplikatuz Z ardatzean. Horrela, LMD bidez 2 geruza gehitu dira, eraikitako estaldurak zehazturiko lodiera-helburua (2 mm) gaintzeko asmoarekin. Geruza bakoitza eraikitzeko, 8,6 minutu behar izan dira. Estaldura fabrikatu ondoren, berriro ere egituraturiko argiaren teknologia erabili da estaldura honen gainazala neurtzeko (5). Neurketa hau (5), jatorrizko 3D ereduarekin (2) konparatu da egokitasun onenaren algoritmoa (*best-fit algorithm*) erabiliz DAVID SL3 softwarearen bidez (6). Horrela, estalduraren lodiera neurtu ahal izan da, azalera guztian helburutzat ezarri den lodiera (2 mm) gaintzen duela ziurtatuz, eta, bide batez, mekanizatuaren bidez zenbat material kendu behar den kalkulatu. Bataz beste, eraikitako estalduraren lodiera 2,6 mm-takoa izan da, eta beraz, mekanizatuaren bidez, 0,6 mm-ko lodiera kendu behar dela kalkulatu ahal izan da.

Bestalde, LMD ibilbideaz gain, akaberako mekanizatuko ibilbideak ere programatu dira PowerMill® softwarearen bidez (7), horretarako, berriro ere takoaren hasierako eredu digitala (2) erabili delarik erreferentziatzat. LMD-ko ibilbideen kasuan bezala, mekanizatuko ibilbideak takoaren goiko gainazalaren formari jarraitzeko irizpidearekin programatu dira «raster» estrategia erabiliz. Kasu honetan, ibilbidea 3 ardatzetan programatu da, eta 0,3 mm-ko distantzia utzi da ibilbidearen joan-etorrien artean, hau da, sakonera erradiala (a_e) 0,3 mm-koa izan da. Gainera, eraikitako estalduraren geometriaren erdia bakarrik mekanizatu da, mekanizatutako alde mekanizatu gabeko aldearekin konparatu ahal izateko. Azkenik, mekanizatuko ibilbide hauek makina hibridoan burutu dira (8), LMD ibilbideak aplikatzeko erabili diren erreferentzia berak erabiliz. Horretarako, 6 mm-ko diametroko boladun erreminta bat erabili da, 4500 rpm-ko biratze-abiadura (N) eta 300 mm/min-ko aitzinapen abiadura (v_f) aplikatuz. Mekanizatu hau 2 aldiz egin da, pasaldi bakoitzean 0,3 mm-ko sakonera axiala (a_p) aplikatuz, estalduraren lodiera 2 mm-koa izan arte eta, beraz, helburutzat jarri den lodiera izan arte.



7. irudia. Egituraturiko argiaren aplikazioa estaldura baten fabrikazio hibridoan.

5. ONDORIOAK

Artikulu honetan aurkeztzen den lanaren bitartez, hau da, berotako estanzazioan erabiltzen diren tako baten estaldura fabrikatuz, egituraturiko argiaren teknologia fabrikazio hibridorako (LMD + mekanizatua) egokia dela baieztatzen da. Teknologia honek takoaren jatorrizko geometria ezaizteza eta digitalizatzea ahalbidetu du, eta honek, era berean, estaldura sortzeko beharrezkoa den LMD prozesuaren ibilbideak era zehatzean programatzea. Horrela, materiala gehitzeko kondizioak konstante mantentzea posible izan da, oinarriaren eta LMD buruaren arteko distantziari eta angeluari dagokienez batez ere, eraikitako estalduran akatsak (poroak, adibidez) sortu ahal izatea saihestuz.

Gainera, egituraturiko argiaren bidez eginiko neurketak, LMD-ko prozesuarekin lortutako estalduraren lodiera zehatza jakitea ahalbidetu du pieza mugitu beharrik gabe, horrela, mekanizatuan sakonera axial egokia aplikatzea ahalbidetuz, helburutzat zehaztu den lodiera lortzeko.

Bestalde, egituraturiko argiaren teknologia makina hibridoan integratua egotearen abantaila ere agerian geratu da. Alde batetik, gehitutako materialaren geometria (kasu honetan, estalduraren lodiera) neurtzeko, pieza ez da makinatik atera behar, eta, beraz, LMD eta mekanizatuko ibilbideak aplikatzeko erreferentzia berak erabili daitezke, honetarako erabiltzen den denbora aurreztuz. Honez gainera, pieza makinan kokatzea

ere posible izan da teknologia honi esker, erreferentzia hauek era errazean kalkulatu ahal izan direlarik. Beste alde batetik, makina hibridoaren abantaila nagusia, prozesu ezberdinak aplikatzeko (LMD eta mekanizatua), pieza leku batetik bestera mugitu behar ez izatea da, eta, beraz, tamaina handiko piezetan horrek dakarren denbora eta kostua aurrezten dela. Hori dela eta, LMD prozesuaren bidez gehitutako materialaren ikuskapena egiteko, beharrezkoa da neurketa sistemak makina hibridoetan integratua egotea, abantaila nagusi honek indarrean jarraitu eta makina hibridoaren kontzeptuak zentzua izan dezan. Integrazio honek gainera, piezaren kokapen eta kontrol prozesuaren erabateko automatizazioa ahalbidetzen lagundu dezake.

Etorkizunean, mekanizatuaren bidez kendu beharreko materiala kalkulatzeko eta LMD eta mekanizatuko ibilbideak aplikatzeko behar diren erreferentziak era automatikoan kalkulatzeko lan egingo da, eta horrela, LMD-neurketa-mekanizatua prozesuen erabateko automatizazioa lortu ahal izango da.

6. ESKER ONAK

Egileek Espainiako Ekonomia eta Lehiakortasun Ministerioa eta Europako Batzordea eskertzen dute, ADDICLEAN (erreferentzia: RTC-2015-4194-5) eta PARADISE (erreferentzia: 723440) proiektuen finantzaketagatik, hurrenez hurren. Azken hau, «*Photonics and Factories of the Future Public Private Partnership*» lankidetzaren ekimena da.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Joseph M. Flynn, Alborz Shokrani, Stephen T. Newman, Vimal Dhokia. 2016. «Hybrid additive and subtractive machine tools – Research and industrial developments». *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, **101**, 79-101.
- [2] <https://www.additivemanufacturing.media/blog/post/hybrid-machine-combines-milling-and-additive-manufacturing>. Publikazio data: 2013ko Azaroak 8.
- [3] <https://www.ibarmia.com/es/actualidad/ibarmia-emo-additive-process-thr16P> Publikazio data: 2015eko Irailak 30
- [4] Frank Chen, Gordon M. Brown, Mumin Song. 2000. «Overview of three dimensional shape measurement using optical methods». *Optical Engineering*, **39(1)**, 10-22.
- [5] François Blais. 2004. «Review of 20 years of range sensor development». *Journal of Electronic Imaging*, **13(1)**, 231-243.

- [6] ZEISS COMET SYSTEM: <http://optotechnik.zeiss.com/en/products/3d-scanning/fringe-projection?ref=zeissimt>. Sarrera data: 2018ko Otsailak 13.
- [7] NUB3D: <http://www.nub3d.com/metrology-system/3d-scanners/sidio-neo/>. Sarrera data: 2017ko Azaroak 15.
- [8] FARO Cobalt Array Imager: <https://www.faro.com/es-es/productos/metrologia-industrial/faro-cobalt-array-imager/>. Sarrera data: 2017ko Azaroak 15.
- [9] PhoXi: http://www.photoneo.com/product-showcase/phoxi_3d_scanners/. Sarrera data: 2017ko Otsailak 13.