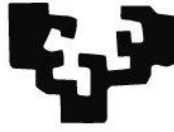


eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

Doktore-tesia

**GMAW teknologian oinarritutako WAAM
prozesuaren garapena eta karakterizazioa
altzairuzko eta aluminio-aleaziozko piezen
fabrikaziorako**

Aurkeztua:

Eider Aldalur Urresti

Ingeniaritza Mekanikoa Saila

Euskal Herriko Unibertsitatea – Universidad del País Vasco

Zuzendariak:

Prof. Dr. Aitzol Lamikiz Mentxaka

Dr. Alfredo Suárez González

Bilbo, 2021ko abendua

Nire gurasoei, Amaia eta Koldo.

Quiero aprovechar estas líneas para agradecer a todas las personas y entidades que me han apoyado y han sido parte durante el desarrollo de esta tesis.

En primer lugar, quiero mencionar a mis directores de Tesis, Alfredo Suárez y Aitzol Lamikiz. A Alfredo, porque esta tesis sin él no habría sido posible. Gracias por tu confianza y motivación constantes, por animarme a aprender y enfrentar nuevos retos y por tu apoyo en muchos sentidos. Los dos sabemos que a veces ha sido intenso, pero también un gran aprendizaje. A Aitzol por hacer posible esta tesis y por orientarme en el camino.

En segundo lugar, agradeceré al resto del equipo WAAM. Teresa Artaza, Ángel San Román, Fernando Veiga y Gorka Puertas, creo que hacemos un gran equipo. En especial, gracias a Gorka por todas las horas que hemos pasado en nuestro robot de GMAW. Toda la experimentación de esta tesis ha sido posible gracias a él y lo aprendido sobre el manejo del robot también. Eskerrik asko! También gracias a Fernando por su dedicación y paciencia al ayudarme con la publicación de los artículos. Aunque el primero de Dyna no nos lo aceptaran creo que hemos llegado bastante lejos. Como muestra los artículos publicados dentro de esta tesis. Gracias a Angel por estar siempre disponible para echarme una mano y gracias también a Teresa por hacer en cierta medida el camino conmigo siempre con una sonrisa.

Quiero destacar también el apoyo recibido por parte de todos mis compañeros del área de Fabricación Avanzada de Tecnalía. Amaia Alberdi, Mikel Ortiz, Pedro Ramiro, Antonio Rubio, Jon Borha Fernández, Txomin Ostra, Germán Rodríguez, Alain Gil Del Val y Mariluz Peñalva gracias por los cafés y por estar siempre dispuestos a ayudarme. Y en especial, a Trunal Bhujangrao y Mikel Casuso por recorrer el camino juntos.

Especial agradecimiento también a la empresa ADDILAN S.L., fabricante de máquinas equipadas con tecnología WAAM, por su apuesta por esta tecnología en la que se centra esta tesis y por todos sus esfuerzos para que esta tecnología entre en el mundo industrial. Además, también agradecer al centro tecnológico Tecnalía la oportunidad brindada para el desarrollo de esta tesis.

A todos ellos, muchas gracias.

Eskerrak baita gurasoei emandako denagatik. Gida eta eredu izateagatik. Eskerrak urteetako sostengu eta laguntzagatik. Egindako esfortzu denengatik. Zuek gabe ez nintzatekeen sekula nagoen lekura iritsiko eta tesi honek ez luke inoiz argia ikusiko. Naizena banaiz zuengatik baita hein batean. Gaizkari ere eskerrak hor izatearren, sarri pazientzia galduarazi arren ez baikara gaizki moldatzen.

Kale o baletarrei. Laguntasunaren zentzua ulertu eta hein batean ezberdin izanagatik bat izatearren. Ainhoa, Amaia, Amaia, Leire, Olatz, Aiora, Itziar eta Ihintza. Eskerrak hainbeste elkarrizketa, parranda eta paseogatik. Elkartasunagatik. Adiskidetasunagatik. Debako lagunei zurito ugarien ondoan izandako momentuengatik.

Mattini bide honetan bidaide izatearren. Momentu on eta ez hain onetan. Tesi bat egitea ideia ona ez zela abisatu arren bidea konpartitzearren. Behar denean helduleku izatearren, amildegira erori aurretik jasotzearren. Zaintzearren, irriak eta negarrak partekatzearren, bizi eta biziaraztearren.

Azkenik, Amaia eta Iratiri eskerrak beti hor izatearren. Erlazio berezia baita gurea. Elkarrizketa sakon, eztabaida bizi eta momentu bereziz betea. Zuekin hasi naiz, zuekin ikasi dut eta zuekin bizi naiz. Zortekoa ni zuek ondoan izatearren. Mila esker denagatik!

Mila esker guztioi!

Laburpena

Fabrikazio-gehigarriak gero eta interes handiagoa sortu du azken urteotan. Teknologia mota horretan, hiru dimentsioko diseinu batetik abiatuta, objektu fisiko bat fabrikatzen da, geruzaz geruza materiala gehituz, bloke trinko batetik kendu ordez. Fabrikazio-gehigarri metalikoaren barruan, erabilitako materialaren eta energia-iturri motaren arabera, hainbat teknologia ezberdin bereizten dira, bakoitzak dituen murrizpenekin materialei, kalitateari, produktibitateari eta eraginkortasunari dagokionez.

Fabrikazio-gehigarri metalikoko teknologien artean, doktore-tesi hau WAAM (*Wire Arc Additive Manufacturing*) izeneko teknologiaren garapenerako burutu da. Teknologia hori Energiaren ezartze zuzena (*DED, Direct Energy Deposition*) kategoriaren barruan sailkatzen da. WAAM teknologiak arku elektrikoa erabiltzen du prozesuan hari metaliko gisara elikatutako materiala urtzeko, eta nahi den geometria jarraituz ezartzen du. Zehazki, doktore-tesi honetan, merkatuan aurki daitezkeen WAAM teknologietatik, GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) teknologian oinarritutako WAAM prozesua sakon aztertzen da.

Azken prozesu horrek interes berezia sortzen du, konplexutasun geometriko ertain eta altua duten pieza handiak fabrikatzeko aukera ematen baitu, koste murriztarekin, ingeniartzako hainbat materialetan eta ezarpen-tasa handiak lortuz. Gainera, teknologia horrekin pieza higituak konpontzea edo oinarrizko egiturei xehetasunak eranstea ere posible da, teknologia horren gaitasunak are gehiago hobetuz. Horregatik guztiagatik, azken urteotan, WAAM teknologiak gero eta interes handiagoa sortu du industria-fabrikazioan, eta 4.0 Industriaren funtsezko zutabeetako bat izango dela aurreikusten da.

Doktore-tesi hau ADDILAN S.A. enpresarekin lankidetzan egindako HARITIVE eta HARI-PLUS proiektuen barnean kokatzen da. Konkretuki, ADDILAN enpresa, makina-erramintaren sektoreko bi enpresa garrantzitsuren baturatik sortu zen eta WAAM teknologiaren bidez piezak fabrikatzeko makina berria merkaturatu berri du. Proiektu horien helburua WAAM prozesuen ezagutzan sakontzea izan da, horietako bakoitzaren onurak zehaztuz eta merkatuari produktu aurreratuago bat eskainiz.

Doktore-tesi honetan erabilitako material nagusiak ER70S-6 aleazio txikiko altzairua eta 5356 aluminio-aleazioa izan dira. Izan ere, bi material horiek asko erabiltzen dira hainbat industrian, batez ere, eskakizun mekaniko handiegirik gabeko tamaina handiko piezak fabrikatzeko. Hala ere, doktore-tesi honetan lortutako emaitzak eta ondorioak beste burdin-aleazio batzuetara edo beste aluminio-aleazio batzuetara estrapola daitezke.

Lan honetan, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren analisiaren zati esperimentalak, doktore-tesian zehar garatu den sistema robotikoan burutu da. Sistema horri, ohiko elementuez gain, monitorizazio- eta kontrol-sistemak ere gehitu zaizkio, horiek funtsezkoak baitira prozesua modu egoki eta kontrolatua gauzatzeko. Zehazki, doktore-tesi honetan, altuera kontrol bat garatu eta ezarri da, soldaduraren barne-seinaleetan oinarrituta ezarpen-prozesua kontrolatzeko.

Gainera, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren parametro nagusien eragina aztertu da eta altzairu eta aluminio-aleazioentzako funtzionamendu-modu egokiaren (GMAW pultsatua, Cold Arc, Force Arc eta AC pulsatua) analisia ere burutu da.

Halaber, ER70S-6 altzairuan, bi ezarpen-estrategia konparatu dira, oszilazio-estrategia eta gainjartze-estrategia, eta 5356 aluminio-aleazioan prozesuaren parametro esanguratsuenen arabera soldadura-kordoi baten zabalera- eta altuera-ereduak diseinatu dira. Gainera, zehaztutako bi materialetan, propietate mekanikoak eta lortutako metalurgia ere aztertu dira.

Azkenik, emaitzak balioztatzeko, lau balioztatze-pieza fabrikatu dira (bi ER70S-6 altzairuzkoak eta beste biak 5356 aluminio-aleaziozkoak) GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua eta garatutako sistema robotikoa erabiliz.

Edukien aurkibidea

EDUKIEN AURKIBIDEA	1
IRUDIEN AURKIBIDEA	7
TAULEN AURKIBIDEA.....	14
AKRONIMOAK	16
I. KAPITULUA : SARRERA	I-1
1 Testuinguru teknologikoa eta industrial.....	I-1
2 Doktore-tesiaren planteamendua. Helburuak	I-5
3 Doktore-tesiaren antolaketa	I-6
II. KAPITULUA : ARTEAREN EGOERA.....	II-1
1 Fabrikazio-gehigarria	II-1
2 Fabrikazio-gehigarri metalikoaren barneko sailkapena	II-4
2.1 Hauts-ohearen fusioa (<i>Power Bed Fusion, PBF</i>).....	II-5
2.2 <i>Binder Jetting</i> (BJ).....	II-7
2.3 <i>Sheet Lamination</i> (SL).....	II-8
2.4 Energiaren ezartze zuzena (<i>Directed Energy Deposition, DED</i>)	II-9
3 WAAM teknologia	II-14
3.1 Sarrera	II-14
3.2 Abantaila eta desabantailak	II-16
3.3 WAAM teknologia motak	II-19
3.3.1 GTAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua	II-19
3.3.2 PAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua	II-20
3.3.3 GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua.....	II-20
4 GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua.....	II-21
4.1 Materialaren transferentzia eta funtzionamendu-moduak	II-21
4.1.1 GMAW estandarra eta GMAW pultsatua	II-23
4.1.2 Cold Arc	II-23

4.1.3	Force Arc	II-25
4.1.4	AC pulsatua	II-25
4.2	Abantaila eta desabantailak	II-26
4.3	GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuko parametroen nagusiak.....	II-27
4.4	Ezarpn-estrategiak	II-28
4.5	Bero-ekarpna materialaren ezarpn-prozesuan.....	II-29
4.6	GMAW prozesuan oinarritutako WAAM teknologia hobetuak	II-30
4.6.1	Bi GMAW elektrodo tandemean kokatuak	II-30
4.6.2	GMAW/GTAW prozesu hibridoak	II-31
4.6.3	GMAW-HW prozesua	II-32
5	Altzairuak eta aluminio-aleazioak.....	II-33
5.1	Altzairuak	II-34
5.2	Aluminio-aleazioak	II-36
6	WAAM teknologiadun makina komertzialak.....	II-40
6.1	ADDILAN.....	II-40
6.2	GEFERTEC.....	II-41
6.3	AML3D	II-42
6.4	RAMLAB	II-42
6.5	Lincoln Electric	II-43
6.6	MX3D	II-43
6.7	Cranfield unibertsitatea	II-43
7	WAAM prozesuaren monitorizazioa eta kontrola.....	II-44
8	WAAM teknologiarako CAD diseinua eta ezarpn-ibilbideen diseinua	II-48

III. KAPITULUA : ALTUERA KONTROLA DARAMAN GMAW TEKNOLOGIAN OINARRITUTAKO WAAM PROZESURAKO SISTEMA ROBOTIKO BATEN GARAPENA..... III-1

1	Sarrera.....	III-1
2	GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesurako sistema robotikoaren deskribapena.....	III-1

3	GMAW sinergikoan oinarritutako WAAM prozesuaren parametro doigarriak	III-4
4	Titan XQ 400 AC puls (EWM) soldadura-iturriaren funtzionamendu-modu sinergikoak	III-7
5	Altuera kontrolaren garapena.....	III-13
5.1	Aurrekariak.....	III-14
5.2	Altuera kontrolaren deskribapena.....	III-17
5.3	Altuera kontrolaren balioztatzea: edalontzi sinple baten fabrikazioa	III-21
6	Ondorioak.....	III-23

IV. KAPITULUA : GMAW TEKNOLOGIAN OINARRITUTAKO WAAM PROZESUA: ER70S-6 ALTZAIRUA

1	Sarrera	IV-1
2	Materialak eta metodoak.....	IV-1
2.1	Materialak.....	IV-1
2.2	Ekipamendua	IV-2
2.3	GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren parametro eta funtzionamendu-modu nagusien analisia: Kordoi sinpleak	IV-2
2.3.1	Intentsitate- eta tentsio-seinaleetan hariaren elikatze-abiaduraren (WFR) eta Stick-outaren eraginaren analisia	IV-2
2.3.2	Lortutako kordoen geometrian aitzinamendu-abiaduraren (TS) eraginaren analisia	IV-3
2.3.3	Penetrazioan, diluzioan, mikroegituran eta gogortasunean funtzionamendu-modu nagusien eraginaren analisia	IV-4
2.4	GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez fabrikatutako horma sinplearen analisia	IV-4
2.5	Oszilazio- eta gainjartze-estrategien alderaketa GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuan.....	IV-5
2.5.1	Parametroen aukeraketarako aurretiazko ikerketa	IV-5
2.5.2	Hormak fabrikatzeko parametroak.....	IV-8
2.6	Karakterizazio metalurgiko eta mekanikorako metodoak	IV-10
3	Emaitzak eta eztabaida.....	IV-12

3.1	GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren parametro eta funtzionamendu-modu nagusien analisia: Kordoi sinpleak	IV-12
3.1.1	Intentsitate- eta tentsio-seinaleetan hariaren elikatze-abiaduraren (WFR) eta Stick-outaren eraginaren analisia	IV-12
3.1.2	Lortutako kordoiaren geometriaren aitzinamendu-abiaduraren (TS) eraginaren analisia	IV-14
3.1.3	Penetrazioan, diluzioan, mikroegituraren eta gogortasunean funtzionamendu-modu nagusien eraginaren analisia	IV-16
3.2	GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez fabrikatutako horma sinple baten analisia	IV-20
3.2.1	Makroegituraren analisia.....	IV-20
3.2.2	Mikroegituraren analisia.....	IV-21
3.2.3	Geometriaren analisia.....	IV-23
3.3	Oszilazio- eta gainjartze-estrategien alderaketa GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuan.....	IV-25
3.3.1	Materialaren ezarpena eta geruzako hazkundera	IV-25
3.3.2	Bero-ekarpenaren analisia (<i>Heat input, HI</i>).....	IV-31
3.3.3	Hozte- eta fabrikazio-denborekin analisia.....	IV-34
3.3.4	Makroegitura, mikroegitura eta gogortasunak.....	IV-36
3.3.5	Propietate mekanikoen ebaluazioa	IV-42
3.3.6	Geometriaren analisia.....	IV-45
3.4	Balioztatzea.....	IV-49
3.4.1	Horma fineko moldea	IV-49
3.4.2	Konpresore baten alabedun pieza eredu	IV-53
4	Ondorioak.....	IV-59

V. KAPITULUA : GMAW TEKNOLOGIAN OINARRITUTAKO WAAM PROZESUA: 5356 ALUMINIO-ALEAZIOA

1	Sarrera.....	V-1
2	Materialak eta metodoak.....	V-1
2.1	Materialak.....	V-1
2.2	Ekipamendua	V-2

2.3	Aluminio-aleazioetarako GMAW funtzionamendu-modu sinergikoen analisia: Kordoiak eta horma sinpleak.....	V-2
2.4	Mikroegituraren eta propietate mekanikoen analisia: Horma gainjarria	V-4
2.5	Karakterizazio metalurgiko eta mekanikorako metodoak	V-4
3	Emaitzak eta eztabaida.....	V-5
3.1	Aluminio-aleazioentzat funtzionamendu-modu sinergikoak.....	V-5
3.2	Transferitutako tanten tamainaren azterketa	V-7
3.3	Aluminio-aleazioetarako GMAW funtzionamendu-modu sinergikoen analisia: kordoi bakarren sorta	V-7
3.3.1	Bero-ekarpenaren analisia (<i>Heat input, HI</i>).....	V-7
3.3.2	Zeharkako sekzioen eta penetrazioen analisia	V-9
3.3.3	Kordoiaren zabalera eta altuera ereduak	V-13
3.4	Aluminio-aleazioetarako GMAW funtzionamendu-modu sinergikoen analisia: Horma sinpleak	V-14
3.4.1	Ezarritako kordoiaren forma geometrikoa	V-14
3.4.2	Mikroegitura	V-16
3.4.3	Porositatearen analisia	V-19
3.5	Mikroegituraren eta propietate mekanikoen analisia: Gainjarritako horma.....	V-21
3.5.1	Mikroegitura	V-21
3.5.2	Gogortasunak	V-23
3.5.3	Propietate mekanikoak	V-23
3.6	Balioztatzea.....	V-23
3.6.1	Karbono-zuntzezko osagaiak fabrikatzeko moldea.....	V-24
3.6.2	Aluminiozko dorreak	V-28
4	Ondorioak.....	V-32
VI. KAPITULUA : EKARPENAK ETA LANAREN ETORKIZUNEN ILDOAK		VI-1
1	Ekarpinak	VI-1
2	Etorkizuneko ildoak.....	VI-4

ERREFERENTZIAK..... 1

Irudien aurkibidea

I-1. irudia. 4.0 Industriaren kontzeptua fabrikazio-gehigarriari aplikatua [INTEGRADDE, 2021].....	I-2
I-2. irudia. Covid-19aren pandemia kontuan hartuta, fabrikazio-gehigarri metalikoaren merkatuaren hazkundearen bilakaeraren hainbat aurreikusitako agertoki [AMPOWER, 2020].....	I-3
I-3. irudia. Mundu mailako WAAM fabrikazio teknologiarren garatzaile nagusiak, teknologietan eta materialetan banatuak.....	I-4
I-4. irudia. Doktore-tesi honi lotutako proiektuen aurrekariak eta bilakaera.....	I-5
II-1. irudia. Hauts-ohearen fusio (PBF) teknologien errepresentazioa.....	II-6
II-2. irudia. Binder Jetting prozesuaren adierazpen eskematikoa ([Pragana, 2021] lanetik egokitua)	II-8
II-3. irudia. Sheet Lamination prozesuaren adierazpen eskematikoa ([Pragana, 2021] lanetik egokitua)	II-9
II-4. irudia. DED teknologien adierazpen eskematikoa: a) LMD teknologia; b) EBAM teknologia; c) WAAM teknologia. c.1) GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua; c.2) GTAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua; c.3) WAAM teknologian oinarritutako PAW prozesua ([Pragana, 2021] lanetik egokitua).....	II-11
II-5. irudia. GMAW prozesuaren errepresentazio grafikoa ([Hu, 2021] lanetik egokitua).....	II-21
II-6. irudia. Materialaren transferentzia mota nagusiak.....	II-21
II-7. irudia. Prozesuaren errepresentazio grafikoa eta intentsitate eta tentsio-seinaleen forma Cold Arc funtzionamendu-moduan ([EWM, 2021] lanetik egokitua).....	II-24
II-8. irudia. Hariaren elikatze kontrolaren fase nagusiak CMT prozesuan [Prado-Cerqueira, 2017].....	II-24
II-9. irudia. Intentsitate-seinalearen forma AC pultsatu funtzionamendu-moduan [EWM, 2021].....	II-25
II-10. irudia. Bi GMAW elektrododun tandem prozesua [Yao, 2016].....	II-31
II-11. irudia. GMAW/GTAW prozesu hibridoa, GTAW zuzia bypass-an sartuta ([Yang, 2016] lanetik egokitua).....	II-32
II-12. irudia. GMAW-HW prozesuaren errepresentazio grafikoa ([Günther, 2018-a] lanetik egokitua)	II-32

II-13. irudia. (a) MX3D enpresak altzairu herdoilgaitzean fabrikatutako zubia [MX3D, 2021], (b) Barne kanalekin altzairuan fabrikatutako pieza [Lincoln Electric Additive, 2021], (c) Norabide anitzeko 10 tutu elkartzen dituen konektorea YHJ507M harian fabrikatua [Yili, 2018], (d) Altzairuan barne kanalekin fabrikatutako pieza [Lincoln Electric Additive, 2021], (e) Altzairuan fabrikatutako hondeatzaile baten besoa osatzen duen pieza [Greer, 2019]	II-36
II-14. irudia. (a) Aluminioan fabrikatutako eta topologikoki optimiazatutako beso robotiko baten pieza [MX3D, 2021], (b) Aluminioan ezarpen-estrategien optimizazioarako RASM systems enpresak fabrikatutako pieza [Ma, 2019], (c) 10 m luze den WAAM bidez fabrikatutako aluminiozko pieza [WAAMMAT, 2021], (d) 2,5 m luze den aluminiozko nerbioa WAAM bidez fabrikatua 500kg-tik gorako materialaren aurrezkiak lortuz [Martina, 2015-a], (e) Nikel-aluminio-brontze aleazioan WAAM bidez fabrikatutako itsasontziko helizea [RAMLAB, 2021]	II-39
II-15. irudia. ADDILAN v.0.1 makina [ADDILAN, 2021]	II-41
II-16. irudia. WAAM GTArc603 makina [GEFERTEC, 2021]	II-41
II-17. irudia. ARCEMY makina GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez piezak fabrikatzeko [AML3D, 2021]	II-42
II-18. irudia. RAMLAB makina Damen Shipyard taldearentzat itsasontzi baten helizearen fabrikazio-prozesuan [RAMLAB, 2021]	II-42
II-19. irudia. Lincoln Electric enpresaren sistema robot antropomorfitik batean oinarritua [Lincoln Electric Additive, 2021]	II-43
II-20. irudia. Eraikuntzaren sektorean MX3D enpresaren aplikazioen adibideak [MX3D, 2021]	II-43
II-21. irudia. WAAM zelula robotikoa, GMAW prozesuan oinarritua, paraleloan lan egiten duten 2 robotekin produktibitatea handitzeko [WAAMMAT, 2021]	II-44
II-22. irudia. WAAM prozesurako monitorizazio- eta kontrol-sistemak ([Xia, 2020] lanetik egokitua)	II-46
II-23. irudia. WAAM prozesurako CCD kameretan oinarritutako kontrol-sistema baten diagrama eskematikoa [Xiong, 2016]	II-47
II-24. irudia. Beso robotiko baten birdiseinua optimizazio topologikoaren bidez [MX3D, 2021]	II-49
II-25. irudia. WAAM sistema integralaren kontzeptua ([Wu, 2018-b] lanetik egokitua)	II-50
III-1. irudia. Erabilitako robot antropomorfitikoa eta soldadura-zuziaren erreprezentazio zehatza (Set-up)	III-2
III-2. irudia. Robotaren eskaneatze posizioa	III-3

III-3. irudia. Garatutako sistema robotikorako erabilitako komunikazio-protokoloaren eskema.....	III-4
III-4. irudia. Stick-outaren, arkuaren luzeraren eta arkuaren zabaleraren definizioa.....	III-6
III-5. irudia. GMAW a) estandarraren eta b) pultsatuaren intentsitate-seinaleak, %20 CO ₂ - %80 Ar babes-gasa erabilia altzairuetan, 1,2 mm-ko hari-diametroarekin (Job 9) eta 5 m/min-ko hariaren elikatze-abiadurarekin.....	III-9
III-6. irudia. (a) GMAW pultsatu funtzionamendu-moduaren intentsitate-seinale teorikoaren forma, %20 CO ₂ - %80 Ar babes-gasarekin altzairuetan, hariaren diametroa 1,2 mm-koa (Job 9) eta hariaren elikatze-abiadura 8 m/min-koa denean; (b) Material urtuaren tanta bat eratzeko prozesua eta intentsitate-seinalearekin prozesu honek duen korrelazioa	III-10
III-7. irudia. Intentsitate-seinale errealak GMAW pultsatu funtzionamendu-modurako altzairuentzat 20% CO ₂ - 80% Ar gasarentzat, 1,2 mm-ko hariaren diametroarekin (Job 9) eta 8 m/min-ko hariaren elikatze-abiadurarekin.....	III-10
III-8. irudia. 3 mm-ko lodiera duen edalontzia Cold Arc moduarekin fabrikatua altzairu herdoilgaitzean, 1 mm-ko hari diametroarekin.....	III-11
III-9. irudia. Cold Arc moduaren intentsitate-seinalea, altzairuetan, %20 CO ₂ - %80 Ar babes-gasarekin, 1,2 mm-ko hariaren diametroarekin (Job 194) eta 5 m/min hariaren elikatze-abiadurarekin	III-11
III-10. irudia. Force Arc a) estandarraren eta b) pultsatuaren intentsitate-seinaleak altzairuetan %20 CO ₂ - %80 Ar babes-gasarekin, 1,2 mm-ko hariaren diametroarekin (Job 180) eta 5 m/min hariaren elikatze-abiadurarekin.....	III-12
III-11. irudia. WFR = 8 m/min eta Stick-out desberdinak dituzten kordoen fabrikazioan zehar jasotako intentsitate-seinaleak.....	III-14
III-12. irudia. WFR = 8 m/min eta Stick-out desberdinak dituzten kordoen fabrikazioan zehar jasotako intentsitate-seinaleen FFT grafikak.....	III-15
III-13. irudia. WFR = 16 m/min eta Stick-out desberdinak dituzten kordoen fabrikazioan zehar jasotako intentsitate-seinaleak eta euren FFT grafikak..	III-15
III-14. irudia. 5 hormen fabrikazioan zehar oinarri-materialaren ondulazioa.	III-16
III-15. irudia. Gainjarritako hiru kordoi dituzten 5 hormen 23. geruzaren fabrikazioan zehar eskuratutako intentsitate-seinalearen zati bat.....	III-16
III-16. irudia. Bi hormetako geruza bakoitzeko soldadura-kordoen erdiko %60an (a) hariaren elikatze-abiaduraren eta (b) intentsitate-seinaleen batez besteko balioak.....	III-17

<i>III-17. irudia. GMAW pultsatu funtzionamendu-modua erabiltzen duten Job-etan eta material desberdinetan hariaren elikatze-abiaduraren eta intentsitatearen arteko erlazioa. Kontuan izan legendan materiala eta Job-a laburbiltzen direla</i>	III-19
<i>III-18. irudia. 9. Job-aren zuzen teorikoa eta Job honekin fabrikatutako kordoi bakarretan intentsitatearen batez besteko balio errealak</i>	III-19
<i>III-19. irudia. Altuera kontrolaren diagrama</i>	III-20
<i>III-20. irudia. Altuera kontrola balioztatzeko egin den edalontziaren fabrikazioan zehar monitorizatutako (a) hariaren elikatze-abiadura, (b) intentsitate eta (c) robotaren altuera balioak.....</i>	III-22
<i>III-21. irudia. Altuera kontrola balioztatzeko fabrikatutako edalontzia.....</i>	III-22
<i>IV-1. irudia. (a) Eskaner laserraren bidez neurtutako 7. kordoiaren profilak, non kordoiaren altuera (h) eta zabalera (w) ikus daitezkeen; (b) 2, 8 eta 13. kordoiaren itxura</i>	IV-6
<i>IV-2. irudia. (a) Gainjartze-estrategiaren ibilbidea; (b) Oszilazio-estrategiaren ibilbidea</i>	IV-9
<i>IV-3. irudia. Bi fabrikazio-estrategietan geruza bakoitzeko batz besteko intentsitate eta tentsio balioak</i>	IV-10
<i>IV-4. irudia. Kordoi baten makrografia, gogortasunak neurtzeko eta mikroegitura behatzeko puntuak adierazita.....</i>	IV-11
<i>IV-5. irudia. Horma sinplearen makrografia, gogortasunak neurtzeko eta mikroegitura behatzeko puntuak adierazita.....</i>	IV-11
<i>IV-6. irudia. Horma oszilatuan eta gainjarrian propietate mekanikoak neurtzeko probeten banaketa</i>	IV-12
<i>IV-7. irudia. Hariaren elikatze-abiaduraren eragina intentsitatearen eta tentsioaren batez besteko balioetan a) GMAW pultsatu moduan, b) Force Arc moduan eta c) Cold Arc moduan.....</i>	IV-13
<i>IV-8. irudia. (a) 2.7 kordoiaren laser bidez eskuratutako puntu-hodeiaren irudikapen grafikoa; (b) 2.8 kordoiaren laser bidez eskuratutako puntu-hodeiaren irudikapen grafikoa; (c) 16 m/min-ko hariaren elikatze-abiadurarekin fabrikatutako soldadura-kordoiak (2.7, 2.8 eta 2.9 kordoiak) eta (d) 2.9 kordoiaren laser bidez eskuratutako puntu-hodeiaren irudikapen grafikoa</i>	IV-15
<i>IV-9. irudia. Horma sinplearen makrografia eta ezarritako lehen kordoiaren xehetasuna.....</i>	IV-21
<i>IV-10. irudia. IV-5. irudian adierazitako horma sinpleko puntuetako mikroegiturak</i>	IV-22

IV-11. irudia (a) Kordoi bikoitien ezarpenaren ondoren laser bidez lortutako puntu-hodeien irudikapen grafikoa; (b) kordoi bakoitien ezarpenaren ondoren laser bidez lortutako puntu-hodeien irudikapen grafikoa eta lortutako horma efektiboa (beltzez).....	IV-24
IV-12. irudia. Kontrol-bolumenaren definizioa.....	IV-25
IV-13. irudia. Kontrol-bolumenaren barnean, horma oszilatua eta gainjarriaren fabrikazioan zuziak jarraitutako ibilbidea eta tanten ezarpena	IV-26
IV-14. irudia. Zuziaren ibilbidea eta abiadura-eremua horma oszilatua fabrikazioan.....	IV-27
IV-15. irudia. 25. eta 26. geruzen geruzako hazkunde bolumetrikoren kalkulua bi hormetan	IV-28
IV-16. irudia. Geruzako batez besteko hazkunde bolumetrikoa. Kontuan izan errore-barrek balio maximoak eta minimoak adierazten dituztela	IV-29
IV-17. irudia. Hormen altuera Z ardatzean, bi hormetan geruzako hazkunde bolumetrikoren bilakaera irudikatzeo neurtua	IV-30
IV-18. irudia. (goian) Lehenengo kordoiaren goitik begiraturako itxura, ibilbide oszilatua uhin-luzeraren ondorioz alboetan markak ikus daitezkeelarik; (behean) lauki gorriak mugatutako bost marken luminantzia-balioak.....	IV-31
IV-19. irudia. Horma (a) gainjarria eta (b) oszilatua fabrikatzean prozesuan hornitzen den energia.....	IV-32
IV-20. irudia. (a) Temperaturaren bilakaera gainjarritako hormaren zortzigarren geruzaren barruko kordoiaren arteko hozte-denboran; (b) Geruzen arteko hozte-denboraren bilakaera gainjarritako horman zehar; (c) Temperaturaren bilakaera oszilatutako hormaren lehenengo zortzi geruzen arteko hozte-denboran; (d) Geruzen arteko hozte-denboraren bilakaera horma oszilatua.....	IV-35
IV-21. irudia (goian) Horma gainjarriaren eta horma oszilatua mikroegituraren analisirako hartutako erreferentzia sistemaren irudikapena; (ezkerrean) horma oszilatua mikroegitura YZ eta XY planoetan; (eskuinean) hormaren gainjarriaren mikroegitura YZ eta XY planoetan.....	IV-37
IV-22. irudia. (ezkerrean) Zeharkako norabidean (XZ planoan) gainjarritako hormaren goialdeko eta behealdeko makroegiturak; (eskuinean) gainjarritako hormaren mikroegiturak. Kontuan izan mikrografiak makrografietan lauki gorriekin markatutako eremuetan atera direla	IV-39
IV-23. irudia. (ezkerrean) Zeharkako norabidean (XZ planoan) oszilazio hormaren goialdeko eta behealdeko makroegiturak; (eskuinean) oszilazio hormaren mikroegiturak. Kontuan izan mikrografiak makrografietan lauki gorriekin markatutako eremuetan atera direla	IV-41

<i>IV-24. irudia. Horma oszilatuta eta gainjarrietatik ateratako probeta (a) horizontalen eta (b) bertikalen tentsio-deformazio kurbak</i>	<i>IV-44</i>
<i>IV-25. irudia. Profilen zeharkako sekzioak eta lautasunaren kalkulua (a) oszilazio-estrategiaren eta (b) estrategia gainjarriaren bidez fabrikatutako hormen goiko gainazaletan</i>	<i>IV-47</i>
<i>IV-26. irudia. Estrategia (a) oszilatuta eta (b) gainjarriaren bidez fabrikatutako hormen zeharkako azalera eraginkorraren kalkulua</i>	<i>IV-48</i>
<i>IV-27. irudia. Bi estrategiekin egindako hormen zeharkako azalera eraginkorra, altuera eta zabalera efektiboaren arabera</i>	<i>IV-49</i>
<i>IV-28. irudia. Moldearen diseinua neurri nagusiak mm-tan adierazita</i>	<i>IV-50</i>
<i>IV-29. irudia. Horma fineko moldearen ER70S-6 altzairuan fabrikatua</i>	<i>IV-51</i>
<i>IV-30. irudia. Moldearen fabrikazioan monitorizatutako intentsitatea, tentsioa eta aitzinamendu-abiadura eta kalkulaturako energia</i>	<i>IV-52</i>
<i>IV-31. irudia. Piezaren kanpoko azaleko puntu neurtuak (puntu beltzak) eta moldearen forma teorikoa</i>	<i>IV-53</i>
<i>IV-32. irudia. a) alabedun piezaren jatorrizko diseinua; b) alabedun piezaren muntaia (arrosaz dagoen pieza da alabedun pieza)</i>	<i>IV-54</i>
<i>IV-33. irudia. (Ezk.) Alabedun piezaren birdiseinua WAAM teknologiarako; (esk.) alabedun piezaren aurreforma WAAM bidez fabrikatzeko</i>	<i>IV-55</i>
<i>IV-34. irudia. Alabedun balioztatze pieza fabrikatzeko sortutako ibilbideak</i>	<i>IV-55</i>
<i>IV-35. irudia. Erdialdeko zatiko ibilbideak: (ezk.) geruza bikoitietako ibilbideak; (esk.) geruza bakoitietako ibilbideak</i>	<i>IV-57</i>
<i>IV-36. irudia. Fabrikatutako eta mekanizatutako alabedun pieza</i>	<i>IV-58</i>
<i>IV-37. irudia. Gehiegizko bero metaketa pieza 10 mm-ko lodierako oinarri-materialaren gainean fabrikatzean</i>	<i>IV-58</i>
<i>V-1. irudia. (ezk.) Horma gainjarrian probeten banaketa; (esk.) fabrikatutako horma</i>	<i>V-5</i>
<i>V-2. irudia. WFR=8 m/min-rekin intentsitate-seinaleak: a) GMAW pultsatua, b) Cold Arc eta c) AC pulsatua</i>	<i>V-6</i>
<i>V-3. irudia. (a) GMAW pultsatu, Cold Arc eta AC pulsatu moduetako intentsitate-seinaleak gainjarrita; (b) hiru moduetako maiztasun-seinaleak gainjarrita</i>	<i>V-6</i>
<i>V-4. irudia. Ratioaren arabera bero-ekarpenaren (HI) balioak hiru funtzionamendu-moduekin eta (a) 4 m/min-ko (1-4 kasuak) eta (b) 8 m/min-ko (5-8 kasuak) hariaren elikatze-abiadurekin egindako kordoietan</i>	<i>V-9</i>

V-5. irudia. (a) GMAW pultsatu, (b) Cold Arc eta (c) AC pultsatu hormen makrografiak. (a.1) Hormen ertzak zehazteko tratatutako makrografia.....	V-15
V-6. irudia. Hormaren zabalera (WW) hormaren altueran (Z ardatza) zehar adierazia, Z ardatzaren balioa nulua izanik hormen goialdean. Kalkulatutako WW-ren balioak eta gainazaleko ondulazio balioak ere ageri dira	V-16
V-7. irudia. (a) GMAW pultsatu, (b) Cold Arc eta (c) AC pultsatu moduen bidez fabrikatutako hormen erdialdeko gunearen mikroegitura: 1) Mikroskopia optikoaren bidez behatutako mikroegitura; 2) EBSD mapak	V-18
V-8. irudia. (a) GMAW pultsatu, (b) Cold Arc eta (c) AC pultsatu hormen erdiko zeharkako sekzioen EBSD mapetako aleen tamainaren banaketa	V-19
V-9. irudia. Porositatea aztertzeko eraso kimikorik gabeko mikrografiak: (a) GMAW pultsatu horma; (b) Cold Arc horma; (c) AC pultsatu horma. (1) hormen goiko gunea; (2) hormen erdiko gunea; (3) hormen beheko gunea.....	V-20
V-10. irudia. GMAW pultsatu, Cold Arc eta AC pultsatu funtzionamendu-moduekin lortutako batez besteko porositate balioak.....	V-21
V-11. irudia. Gainjarritako hormaren mikroegitura XZ, YZ eta XY planoetan handipen ezberdinekin (x50, x200)	V-22
V-12. irudia. Aluminiozko moldearen bidez karbono-zuntzean fabrikatu beharreko piezaren diseinua	V-24
V-13. irudia. Moldearen diseinua, kotak mm-tan	V-25
V-14. irudia. Moldearen ezarpen-ibilbidea eta -sekuentzia.....	V-25
V-15. irudia. WAAM bidez fabrikatutako aluminiozko moldea (ezk.) fabrikaziotik atera den bezala eta (esk.) azken mekanizazioaren ondoren	V-27
V-16. irudia. Dorreak diseinatzeko eta fabrikatzeko prozesua.....	V-29
V-17. irudia. Aluminiozko dorrean ondoz ondoko bi geruzaren ezarpen-ibilbideak	V-31
V-18. irudia. Matrizialki fabrikatutako lau dorreak.....	V-31
VI-1. irudia. Doktore-tesi honetan garatu den sistema robotikoaren zuziaren irudikapena, HW gehituta	VI-5

Taulen aurkibidea

<i>II-1. taula. SLM eta EBM teknologien ezaugarri nagusiak.....</i>	<i>II-7</i>
<i>II-2. taula. Fabrikazio-gehirri metalikoko teknologien arteko konparaketa.</i>	<i>II-13</i>
<i>II-3. taula. Hainbat estrategiaren bidez fabrikatutako hormak definitzeko erabilitako nomenklaturaren laburpena</i>	<i>II-28</i>
<i>II-4. taula. ER70S-6 altzairu gozoan, autore ezberdinek ezarpen-estrategia ezberdinen bidez, WAAM teknologiarekin, fabrikatutako piezen propietate mekanikoen alderaketa</i>	<i>II-35</i>
<i>II-5. taula. Babes-gas gisa purutasun altuko nitrogenoa eta argona erabilia WAAM teknologia bidez fabrikatutako 5356 aluminio-aleazioaren propietate mekanikoak.</i>	<i>II-38</i>
<i>III-1. taula. GMAW sinergikoan oinarritutako WAAM prozesuaren parametro nagusiak.....</i>	<i>III-5</i>
<i>III-2. taula. Titan XQ 400 AC puls (EWM) soldadura-iturrian altzairuetarako erabiltzen diren funtzionamendu-modu nagusiak.....</i>	<i>III-13</i>
<i>IV-1. taula. ER70S-6 altzairuzko hariaren konposizio kimikoa pisuan (%)</i>	<i>IV-1</i>
<i>IV-2. taula. Hariaren elikatze-abiaduraren eragina ikusteko fabrikatutako soldadura-kordoiaren parametroak.....</i>	<i>IV-3</i>
<i>IV-3. taula. Funtzionamendu-modu bakoitzaren mikroegitura, diluzioa eta penetrazioa aztertzeko egindako kordoiaren fabrikazio-parametroak</i>	<i>IV-4</i>
<i>IV-4. taula. ER70S-6 altzairuan oszilazio- eta gainjartze-estrategiak erabilia hormak fabrikatzeko parametroak hautatzeko entsegua</i>	<i>IV-5</i>
<i>IV-5. taula. Neurtutako eta kalkulaturako kordoiaren geometria definitzeko balioak</i>	<i>IV-7</i>
<i>IV-6. taula. Horma oszilatuaren eta gainjarriaren fabrikazio-parametroak....</i>	<i>IV-10</i>
<i>IV-7. taula. Aitzinamendu-abiaduraren eragina zehazteko kordoiak fabrikatzeko erabilitako parametroak eta eskaner laserraren bidez neurtutako kordoiaren zabalera eta altuera balioak</i>	<i>IV-14</i>
<i>IV-8. taula. Kordoiaren zeharkako makrografiak, diluzioa eta kordoiaren penetrazioa neurtuta funtzionamendu-moduaren eragina ikusteko</i>	<i>IV-17</i>
<i>IV-9. taula. 3.1 kordoiaren mikrografiak, IV-4. irudian definitutako bost puntuetan eta puntu horiei dagozkien gogortasun balioak</i>	<i>IV-19</i>
<i>IV-10. taula. Geruzako hazkundearekin erlazionaturako parametroak bi hormetan</i>	<i>IV-30</i>
<i>IV-11. taula. Bi hormetan bero-ekarpenarekin erlazionaturako parametroak</i>	<i>IV-33</i>

IV-12. taula. Fabrikazio-denborak	IV-36
IV-13. taula. Fabrikatutako hormen gogortasun balioak.....	IV-42
IV-14. taula. Fabrikatutako bi hormetako zeharkako norabideko gogortasunaren bilakaeraren azterketa.....	IV-42
IV-15. taula. Charpy entsegutik eta trakzio-saiakuntzetatik bi hormetan lortutako emaitzen batez besteko balioak eta desbideratze estandarrak. Hariaren hornitzaileak aurrez definitutako material soldatuaren balio mekanikoak ere adierazten dira alderaketarako.....	IV-45
IV-16. taula. Horma fineko moldearen fabrikaziorako erabilitako parametroak	IV-51
IV-17. taula. Alabedun balioztatze-piezaren fabrikazio parametroak.....	IV-57
V-1. taula. Al5356 hariaren konposizioa pisuan (%).....	V-2
V-2. taula. Kordoi bakarreko sortaren fabrikazio-parametroak alderatutako hiru funtzionamendu-moduetarako: GMAW pultsatua, Cold Arc eta AC pulsatua.	V-3
V-3. taula. Horma gainjarriaren fabrikazio-parametroak.....	V-4
V-4. taula. Hiru funtzionamendu-moduen bidez fabrikatutako kordoi bakarretarako, hariaren elikatze-abiadura maila bakoitzerako intentsitatearen, tentsioaren eta transferitutako tanten bolumenaren balioak.....	V-8
V-5. taula. WFR = 4 m/min duten kordoiaren zeharkako sekzioak hiru funtzionamendu-moduetan.....	V-10
V-6. taula. WFR = 8 m/min duten kordoiaren zeharkako sekzioak hiru funtzionamendu-moduetan.....	V-11
V-7. taula. Hiru funtzionamendu-moduekin egindako kordoiaren zabalera, altuera eta penetrazio balioak	V-12
V-8. taula. Horma gainjarriaren gogortasun balioen emaitzak.....	V-23
V-9. taula. 5356 aluminio-aleaziozko horma gainjarriaren trakzio-saiakuntzetatik eta Charpy entsegutik lortutako balioak	V-23
V-10. taula. 5356 aluminio-aleaziozko moldearen fabrikazio-parametroak ...	V-27
V-11. taula. Diseinu originalaren, FGraiko topologikoki optimizatutako birdiseinuaren eta WAAMerako topologikoki optimizatutako bi birdiseinuen pisuen alderaketak	V-29
V-12. taula. Dorre bakarra eta lau dorre matrizialak fabrikatzeko parametroak.	V-30

Akronimoak

FG	Fabrikazio-gehigarria
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Ordenagailuz sortutako diseinua (<i>Computer-Aided Design</i>)
PBF	Hauts-ohearen fusioa (<i>Power Bed Fusion</i>)
DED	Energiaren ezartze zuzena (<i>Direct Energy Deposition</i>)
BJ	Binder Jetting
SL	Sheet Lamination
ME	Material Extrusion
MJ	Material Jetting
VP	Estereolitografia (<i>Vat Photopolymerization</i>)
SLM	Laser bidezko fusio selektiboa (<i>Selective Laser Melting</i>)
EBM	Elektroi-sorta bidezko fusioa (<i>Electron Beam Melting</i>)
DMLS	Metalen laser bidezko sinterizazio zuzena (<i>Direct Metal Laser Sintering</i>)
LOM	Laminated Object Manufacturing
CBAM	Composite Based Additive Manufacturing
UAM	Ultrasonic Additive Manufacturing
LMD	Laser Metal Deposition
EBAM	Electron Beam Additive Manufacturing
WAAM	Arku eta hari bidezko fabrikazio-gehigarriko prozesua (<i>Wire Arc Additive Manufacturing</i>)
NNS	Near Net Shape
WFR	Hariaren elikatze-abiadura (<i>Wire Feed Rate</i>)
TS	Aitzinamendu-abiadura (<i>Travel Speed</i>)
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
PAW	Plasma Arc Welding
CMT	Cold Metal Transfer
HW	Hari beroa (<i>Hot Wire</i>)

CAM	Ordenagailuz lagundutako fabrikazioa (<i>Computer-Aided Manufacturing</i>)
DR	Ezarpen-tasa (<i>Deposition Rate</i>)
DPM	Dynamic Path Modification
HAZ	Termikoki kaltetutako zonaldea (<i>Heat Affected Zone</i>)
EG	Ezaugarri geometriko
OVL	Gainjarria (<i>Overlapped</i>)
OSC	Oszilatua (<i>Oscillated</i>)
HI	Bero-ekarpena (Heat Input)
UTS	Haustura-tentsioa (<i>Ultimate Tensile Strength</i>)
YS	Limite elastikoa (<i>Yield Strength</i>)
EBSD	Elektroien atzerakadan oinarritutako difrakzioa azterketa (Electron Back-Scattered Diffraction)
PSD	Potentzia dentsitate espektrala (Power Spectral Density)
WW	Hormaren zabalera (Wall Width)

I. KAPITULUA

I. KAPITULUA: SARRERA

1 Testuinguru teknologikoa eta industrialia

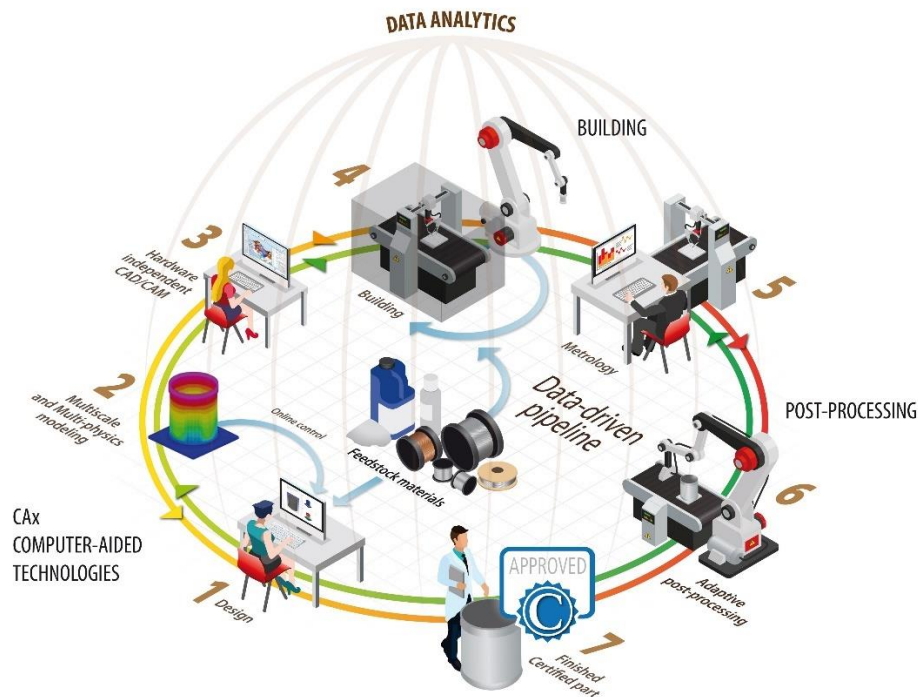
Fabrikazio-gehigarria (FG) etorkizun handia izango duela aurreikusten den ekoizpen kontzeptua da, eta azken urteotan gero eta interes handiagoa sortu du hainbat industria-sektoretan. Teknologia mota horretan, hiru dimentsioko (3D) diseinu digital batetik abiatuta objektu fisiko bat fabrikatzen da, geruzaz geruz materiala gehituz [Herzog, 2016]. ASTMk honela definitzen du fabrikazio-gehigarria: “3D ereduetatik abiatuta piezak fabrikatzeko materiala geruzaz geruz gehitzen duten prozesuen multzoa, kenketa-fabrikazioko teknologiek ez bezala” [ISO/ASTM, 2015].

Fabrikazio-gehigarria lehen aldiz 1986an agertu zen prozesu egonkor bat bezala, polimero fotosentikorrek geruzaz geruz ontzeko izpi ultramoreak erabiltzen dituen estereolitografia teknologia sortu zenean [Singh, 2020]. Jatorrian, fabrikazio-gehigarriari 3D inprimaketa ere deitu zitzaion, eta bertan elkarren segidako material geruzak gainjarriz hiru dimentsioko objektuak sortzen zituzten fabrikazio-teknologia guztiak bildu ziren. Hori dela eta, fabrikazio-gehigarriko makinei 3D inprimagailu ere deitzen zaie, material desberdinetan piezak edo pieza multzoak inprimatzeko gaitasuna dutelarik. Gainera, historikoki, 1980ko hamarkadan, fabrikazio-gehigarriko teknikak prototipo funtzional edo estetikoak ekoizteko soilik erabiltzen ziren, eta hori dela eta, teknologia mota honentzako termino egokiagoa prototipatze azkarra zen (*rapid prototyping*) [Guo, 2013].

Azken urteetan, ordea, 3D inprimaketaren zehaztasuna, errepikakortasuna eta material gama handitu egin dira, eta teknologia batzuk industria-ekoizpenerako bideragarritzat jotzen dira. Horregatik, “fabrikazio-gehigarria” terminoa 3D inprimaketaren sinonimo egokiagotzat jotzen da [Li, 2019]. Hala, ekonomia, ingurumen eta diseinu aldetik prestazio hobeak dituzten osagai errealean eskariak, azken aldian, fabrikazio-gehigarriaren garapena bultzatu du. Gainera, horrelako teknologiak disruptiboak izango direla aurreikusten da, eta munduko ekoizpen-sarea eraldatuko dute, hainbat industria-sektoretarako ezinbesteko tresna bihurtuz.

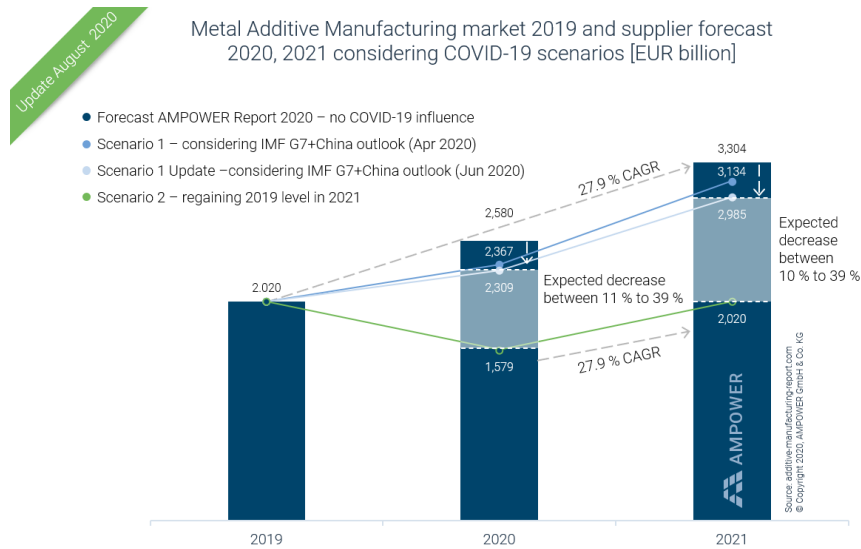
Ekoizpen-sistema adimendunak eta informazio-teknologiak gaur egungo industria-sistemetan integratzea 4.0 Industriaren oinarria da, ekoizpen-sistema adimendunak eta aurreratuak sortzeko. Hala, interkonektagarritasuna, automatizazioa, ikaskuntza automatizatua eta datuak denbora errealean eskuratu eta tratatzea 4.0 Industriaren helburu nagusiak dira. Integrazio ziberfisiko horrek eraginkortasun handiko fabrika adimendunak sortzen ditu, produktu pertsonalizatuak eta kalitate handikoak fabrikatzeko gai izanik. Bide horretan,

fabrikazio-gehigarriak 4.0 Industriak planteatzen duen ekoizpen-sistemaren garapenari erantzuten dio, eta hasierako diseinutik azken piezarako bidea errazten du. Gainera, diseinu askatasun handiko piezak egiteko eta piezak pertsonalizatzeko aukera ematen du. Hain zuzen ere, laugarren industria iraultza gertatzea, neurri batean, fabrikazio-gehigarriak bereganatu ditzakeen gaitasunen araberakoa izango da, eta teknologia horiek zehaztuko dute industria-aro berri horren garapena [Dilberoglu, 2017]. Zehazki, I-1. irudian ageri da 4.0 Industriaren kontzeptua, fabrikazio-gehigarriko teknologiei aplikatua.



I-1. irudia. 4.0 Industriaren kontzeptua fabrikazio-gehigarriari aplikatua [INTEGRADDE, 2021]

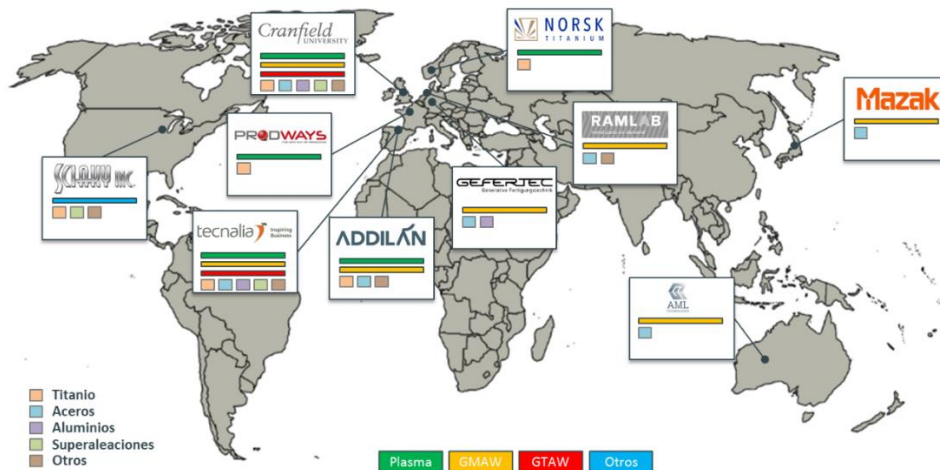
Fabrikazio-gehigarri metalikoaren merkatuaren hazkundearentzat aurreikuspenak baikorrak baziren ere, murriztu egin dira Covid-19aren pandemiaren ondorioz (I-2. irudia). Pandemiaren ondorioz gertatutako merkatuaren uzkuertzeak, aurreikuspenak zenbait urte atzeratzea espero da, denbora beharko baitute merkatuek erabat berreskuratzeko. 2025etik aurrera fabrikazio-gehigarriaren merkaturia handitzen hastea aurreikusten da, baina 2030era arte ez da hazkunde hau guztiz osatuko [Harrop, 2020].



I-2. irudia. Covid-19aren pandemia kontuan hartuta, fabrikazio-gehigarri metalikoaren merkatuaren hazkundearen bilakaeraren hainbat aurreikusitako agertoki [AMPOWER, 2020]

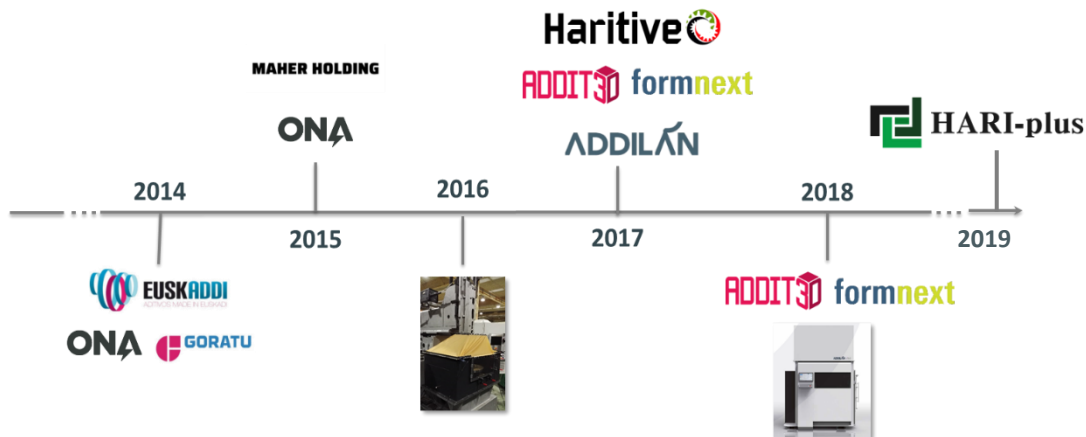
Ondoren azalduko diren fabrikazio-gehigarri metalikoko tekniken barruan sailkatutako teknologia guztien artean, WAAM teknologia da hari gisara elikatutako materiala urtzeko eta nahi den geometriarekin ezartzeko arku elektriko bat erabiltzen duena. Datozen urteetan, teknologia horren eskaria handitu egingo dela aurreikusten da, fabrikazio-gehigarria gero eta gehiago sartuko baita hainbat industrian, hala nola automobilgintzan, industria aeroespazialean, defentsan, medikuntzan, oil & gas sektorean, etab. Izan ere, sektore horietarako WAAM teknologiari esker pieza handiak eta konplexuak fabrika daitezke, pieza higituak konpondu daitezke edo oinarrizko egiturei xehetasunak erantsi dakizkieke, datozen urteetarako eskaria are gehiago hobetuz.

Horregatik guztiagatik, azken urteotan, WAAM teknologiak gero eta interes handiagoa sortu du industria-fabrikazioaren sektorean, tamaina handiko eta konplexutasun geometriko ertaineko pieza metalikoak kostu txikiarekin fabrikatzeko aukerari esker [Cunningham, 2018]. II-3. irudian, mundu mailako WAAM makina-fabrikatzaile eta teknologia-garatzzaile nagusiak ikus daitezke.



I-3. irudia. Mundu mailako WAAM fabrikazio teknologiarren garatzaile nagusiak, teknologietan eta materialetan banatuak

Testuinguru horretan, ADDILAN S.A. enpresak WAAM teknologiarren bidez pieza fabrikatzeko makina berria merkaturatu berri du. I-4. irudian ikus daitekeenez, ADDILAN S.A. Euskadiko makina-erreminta sektoreko bi enpresa garrantzitsuren, Maher Holding Taldearen eta ONA Electroerosión enpresaren, arteko I+G proiektu baten emaitza da. Bi enpresek, Goratuk, Maher Holding-en aldetik, eta ONAk, EUSKADDI proiektuan parte hartu zuten, Etorgai 2014 deialdiaren barruan, Energiaren ezartze zuzena (*Direct Energy Deposition, DED*) fabrikazio-gehigarriko teknologiarren barruan kokatzeko asmoz. Proiektu horren emaitza nabarmen gisara, bi enpresek WAAM teknologiarren aldeko apustua egitea eta bakoitzak bere gaitasun onenak eskaintzea erabaki zuten, makina- eta teknologia-soluzio diferentziala merkaturatzeko. 2017. urtean, ADDILAN enpresa sortu zen eta HARITIVE proiektuaren barruan teknologia garatzen jarraitu zuten. HARITIVE proiektua mugari disruptiboa izan zen industrian, WAAM teknologia duen CNC kontrolean oinarritutako lehen makina aurkeztu baitzuten beronen baitan. Ondoren, aurrera jarraitzeko, HARI-PLUS proiektua aurkeztu zen 2019an. Proiektu horren helburua WAAM prozesuen ezagutzan sakontzea zen, horietako bakoitzaren onurak identifikatuz, merkatuari irtenbiderik aurreratuen eskaini ahal izateko. Hala, doktore-tesi hau ADDILAN enpresarekin lankidetzan egindako HARITIVE eta HARI-PLUS proiektuen barruan kokatzen da.



I-4. irudia. Doktore-tesi honi lotutako proiektuen aurrekariak eta bilakaera

2 Doktore-tesiaren planteamendua. Helburuak

Azkenaldian GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua intentsiboki aztertu den arren, literaturan ez da ikerketa sakonik egin, esate baterako, sartutako intentsitate-seinalearen forma eta efektuari buruz, ezarpen-estrategia desberdinei buruz edota aluminio-aleazioak ezartzeko funtzionamendu-modu desberdinek piezaren akats eraketan, nagusiki porositatean, duten erlazioari buruz.

Hala, doktore-tesi honen helburu nagusia GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua garatzea eta karakterizatzea da, ER70S-6 aleazio txikiko altzairuan eta 5356 aluminio-aleazioan, doktore-tesian zehar diseinatutako sistema robotikoa erabiliz.

Helburu orokor hori lortzeko, lan honen helburu teknologikoak hauek dira:

1. GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez piezak automatikoki eta kontrolpean fabrikatzeko sistema robotiko bat garatzea, monitorizazio- eta kontrol-tresnak integratuta.
2. GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesura egokitutako kontrol sistemak diseinatu eta ezartzea, ezarpen optimoa eta akatsik gabea lortzeko.
3. WAAM prozesuaren parametro nagusien eta ER70S-6 altzairuarentzako funtzionamendu-modu ezberdinen eragina aztertzea.
4. Oszilazio-estrategia gainjartze-estrategiarekin konparatzea, geruzen hazkundearen, bero-ekarpenaren, mikroegituraren, propietate mekanikoen eta geometriaren arabera.
5. 5356 aluminio-aleaziorako egokienak diren funtzionamendu-moduen eragina aztertzea.

6. GMAW teknologiaren bidez, ezarritako soldadura-kordoen zabalera eta altuera auresateko, prozesuaren parametro esanguratsuenen araberako ereduak diseinatzea.

3 Doktore-tesiaren antolaketa

Aurreko atalean aurkeztu diren helburu teknologikoak modu egituratuan lantzeko, doktore-tesi hau honela egituratu da:

1. Lehenengo kapituluan, fabrikazio-gehigarriaren gaur egungo testuinguru teknologikoa eta industrialia aurkeztu dira, baita doktore-tesi honen helburuak ere.
2. Bigarren kapituluan, fabrikazio-gehigarriak zertan datzan azaldu ondoren, berrikuspen bibliografiko bat egin da, fabrikazio-gehigarri metalikoaren egoera laburbiltzen duena, batez ere, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuan zentratuta. Lehenik eta behin, teknologia mota horretako funtzionamendu-modu ezberdinek materialaren transferentzia-prozesuetan duten efektua berrikusi da. Horrez gain, baita prozesuan zehar izan daitezkeen ezarpen-estrategia ezberdinen influentzia eta bero-ekarpenaren eragina ere. Bigarrenik, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua hobetzeko bibliografian aurkitu diren bideak laburbildu dira. Ondoren, WAAM bidez doktore-tesi honetan zehar ezarritako bi materialetan beste autore batzuek egindako lanak aurkeztu dira: ER70S-6 altzairuan eta 5356 aluminio-aleazioan. Azkenik, hainbat fabrikatzailek garatutako WAAM teknologia duten makinak eta beste autore batzuek diseinatutako monitorizazio- eta kontrol-sistemak aipatu dira.
3. Hirugarren kapituluan, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua integratzen duen sistema robotiko baten garapena aurkeztu da. Sistema hori monitorizazio- eta kontrol-sistema batez hornitu da. Monitorizazio- eta kontrol-sistemak funtsezkoak dira prozesua modu egoki eta kontrolatuan gauzatu ahal izateko.
4. Laugarren kapituluan, III. kapituluan garatutako sistema robotikoan, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez ER70S-6 aleazio txikiko altzairuan egindako esperimendua deskribatu da. Lehenik eta behin, soldadura-kordoi sinpleak egin dira prozesuaren parametro nagusien eragina eta altzairuentzako funtzionamendu-modu egokienak aztertzeko (GMAW pultsatua, Cold Arc eta Force Arc). Bigarrenik, horma sinple bat fabrikatu eta metalurgikoki eta geometrikoki aztertu da. Azkenik, osilazio-estrategia gainjartze-estrategiarekin

konparatu da. Gainera, lortutako emaitzak balioztatzeko, bi pieza fabrikatu dira WAAM teknologiaren bidez material horretan.

5. Bosgarren kapituluan, 5356 aluminio-aleazioarentzat, IV. kapituluan ER70S-6 altzairuarentzat deskribatutako esperimenezioa errepikatu da, ezarpen-estrategien azterketa izan ezik. Gainera, soldadura-kordoen zabalera eta altuera prozesuaren parametro esanguratsuenen arabera aurrerako aukera ematen duten eredu esperimentalak ere garatu dira.
6. Seigarren eta azken kapituluan, ikerketa-lan honek artearen egoeran egin dituen ekarpen nagusiak laburbildu dira, eta baita etorkizunari begira sortzen diren ikerketa-ildo berriak ere.

II. KAPITULUA

II. KAPITULUA: ARTEAREN EGOERA

1 Fabrikazio-gehigarria

Fabrikazio-gehigarriaren abantaila nagusienetako bat konplexutasun geometriko handiko piezak fabrikatzeko gaitasuna da; beste teknologia batzuk erabilia ezinezkoak liratekeen piezak, esaterako, pieza hutsak, xehetasun konplexuak dituztenak edo barne-sare konplexudunak. Beraz, fabrikazio-gehigarriaren bidez, diseinu-askatasun handia lortzen da, eta hori funtsezkoa da, adibidez, pisu murrizketak behar dituzten aplikazioetarako. Murrizketa horiek diseinuaren optimizazio topologikoaren bidez egin daitezke [Zhu, 2021], pieza trinkoen orde z barne-sareak dituztenak eginez, edo pieza bakar batean fabrikatuz teknika tradizionalekin azpi osagai asko behar zituzten zatiak. Adibidez, General Electric konpainiak, bere CFM LEAP hegazkin-motorrean, fabrikazio-gehigarriaren bidez fabrikatutako erregai-injektoreak sartu zituen. Injektore berriak osagai bakarrean fabrikatuta zeuden eta hasierako 18 piezako sistema baino, %25 arinagoak ziren [General Electric, 2017].

Gainera, fabrikazio-gehigarriaren bidez pertsonalizazioa ere aukera bihurtzen da [Tofail, 2018]; izan ere, fabrikazio-teknika tradizionaletan, pieza konplexuen pertsonalizazioa mugatua da, horrek dakarren kostuagatik. Gehienetan, kostu hori tirada luzeak eskatzen dituzten molde eta erraminta konplexuen beharrek lotuta dago. Aldiz, fabrikazio-gehigarriaren bidez, piezak ordenagailuz sortutako diseinu (*Computer Aided Design, CAD*) batetik abiatuta zuzenean fabrikatzen direnez, pieza bakarrak eta pertsonalizatuak egitea bideragarria da, tresneria garestirik gabe [Satish Prakash, 2018].

Orain arte, ohiko kenketa-teknikek bloke trinko batetik abiatuta fabrikatzen zituzten piezak, eta behar zen materiala ezabatzen zuten nahi zen geometria lortu arte. Fabrikazio-gehigarriaren barruan sailkatutako teknologiek, ordea, materiala behar den tokian bakarrik gehitzen edo ezartzen dute, erabilitako lehengai-kopurua minimizatuz eta, beraz, fabrikatu beharreko piezen kostua nabarmen murriztuz [Hosseini, 2019]. Horren ondorioz, fabrikazio-gehigarriak merkatu aukera handi bat izan lezake, esate baterako, industria aeronautikoan, erabilitako materialen (titanioa, nikel-aleazioak, etab.) prezio altua eta osagaien *buy-to-use* ratio handia direla eta [Ding, 2015-a].

Hala, fabrikazio-gehigarriko teknologien bidez, amaierako geometriatik hurbil dauden piezak lortzen dira (*Near Net Shape* prozesu kontsideratzen direlarik honakoak), eta lehengaien aprobetxamendu-tasa oso handia da. Hala, postprozesurik gabe edo postprozesu gutxirekin, fabrikatutako aurreformatik azken piezara igarotze posible izango da [Tofail, 2018]. Testuinguru horretan,

Hybrid Manufacturing terminoa sartzen da jokoan. *Hybrid Manufacturing* terminoak fabrikazio-gehigarriko prozesuen eta prozesu tradizionalen (eskuarki, mekanizazio-prozesuen) konbinazioan oinarritutako fabrikazio-prozesuak hartzen ditu kontuan, prozesu mota bakoitzaren bidez lortzeko zailak (edo are gehiago, ezinezkoak) diren piezak sortzeko. Gainera, hibridazio horren bidez, fabrikazio-gehigarriko teknologien produktibitate baxuarekin, gainazal-akaberarekin eta neurri-zehaztasunarekin erlazionatutako mugak gaindi daitezke [Pragana, 2021].

Fabrikazio-gehigarriko teknologiek ahalmen handia erakutsi dute energia kontsumoa murrizteko alferrik galdutako material kantitatea eta mekanizazio-urratsak ezabatuz. Esaterako, aurrera eramandako zenbait azterketetan iragarri da, fabrikazio-gehigarriaren erabilera orokorrak energia-eskaera %27 jaitsiko lukeela [Sun, 2021].

Gaur egun, fabrikazio-gehigarriak dentsitate osoa duten piezak sor ditzake material-sorta zabal batean, hala nola, polimeroak [Jafferson, 2021], metalak [Herzog, 2016], material zeramikoak [Zhang, 2020-c], konpositeak [Parandoush, 2017], etab. Material polimerikoen fabrikazio-gehigarria, seguruenik, gehien aztertu dena izan da, halako materialek behar dituzten prozesatze- eta fusio-temperatura baxuak direla medio, eta ez dutelako ez babes-gasik, ez lan egiteko atmosfera babesturik behar. Aldiz, material metaliko eta zeramikoen urtze-temperaturak altuagoak dira, eta ez dira hain erraz prozesatzen [Tofail, 2018]. Hala ere, azkenaldian, gero eta interes handiagoa ari dira irabazten halako materialen fabrikazio-gehigarriko teknologiak. Gainera, fabrikazio-gehigarriko teknologiek aukera ematen dute material anitzeko piezak sortzeko, hau da, material mota batez baino gehiagoz osatutako piezak fabrikatzeko. Hain zuzen ere, pieza mota hau, orain arte fabrikazio-teknika tradizionalekin egitea ez zen posible [Bandyopadhyay, 2018].

Azken 30 urteetan, fabrikazio-gehigarriaren barnean sailkatzen diren teknikak hainbat sektoretarako erabili izan dira, hala nola, sektore aeroespazialean [Shi, 2020], sektore aeronautikoan [Gisario, 2019], automobil industrian [Delic, 2020], sektore biomedikoan [Rezvani, 2021], energiaren sektorean [Ermakova, 2019] [Sun, 2021], erreminten, tresnen eta moldeen sektorean [Hao, 2021], eraikuntza sektorean [Paolini, 2019], etab.

-Sektore aeronautikoa eta aeroespaziala: Sektore horietan, osagaiak geometria konplexuak izan ohi dituzte, eta prestazio altuko material metalikoz eginak daude, hala nola, titanio-aleazioz, nikel-aleazioz, altzairu bereziz eta zeramikaz; piezek oso tenperatura altuetan lan egiten baitute. Horrelako piezen ohiko fabrikazioa garestia eta luzea izaten da, eta, gainera, tiradak

laburrak izaten dira (milaka pieza ingurukoak). Hori dela eta, mota horretako sektoreetan fabrikazio-gehigarriak merkatu handia izango duela aurreikusten da [Guo, 2013].

-Automobilgintza: Automobil industrian, bestalde, tiradak luzeak izaten dira, eta horregatik, fabrikazio-gehigarria batez ere piezen diseinu-etapetan erabiltzen da eta ez serieko fabrikazioan. Hala, teknologia mota hau garrantzitsua da osagai berriak diseinatzeko eta garatzeko denborak eta garapen-zikloen kostuak minimizatzeko. Gainera, horrelako teknologiak tirada laburrak dituzten pieza estruktural eta funtzionalak, hala nola, motor-ihesak, transmisio-ardatzak, abiadura-kaxaren osagaiak eta luxuzko ibilgailuetarako balaztatze-sistemak fabrikatzeko ere erabili izan dira. Hala ere, ez dira ohikoak automobilen ekoizpen-bolumen handiko piezetarako. Azkenik, lasterketetarako ibilgailuak fabrikatzeko ere erabiltzen dira fabrikazio-gehigarriko teknologiak; izan ere, esparru honetan aleazio arinetan fabrikatutako piezak izaten dira (adibidez, titaniozkoak), egitura oso konplexudunak eta ekoizpen-bolumen txikiekin [Satish Prakash, 2018].

-Biomedikuntzaren sektorea: Fabrikazio-gehigarrian, biomaterialetan, biologia-zientzietan eta biomedikuntzan berriki egin diren garapenei esker, fabrikazio-gehigarriko tekniken aplikazio eremua zabaldu egin da sektore honen barruan, produktu ortopedikoak, inplanteak, ehunen hazkuntzarako "scaffold-ak", organo artifizialak, gailu medikoak, sare mikrobaskularrak, txip biologikoak eta abar fabrikatzeko. [Sheoran, 2020].

-Energia-sektorea: Azken urteotan, fabrikazio-gehigarriko teknologiak gero eta gehiago erabili izan dira energia sortzeko, bihurtzeko eta biltegitatzeko garapen berrietan, errendimendua eta sistemen eraginkortasun energetikoa hobetzeko. Adibidez, energia nuklearreko instalazioetan, fabrikazio-gehigarriari esker, piezak fabrika daitezke in situ, nukleo nuklearreko osagaien fabrikazioa bizkortuz egungo eta etorkizuneko erreaktore aurreratuen flotetarako. Bestalde, FGko teknikak pieza funtzionalak fabrikatzeko ere erabili dira, erregai-pilen propietate elektrokimikoak egokitzeko [Hughes, 2019].

-Erreminten, tresnen eta moldeen sektorea: Fabrikazio-gehigarriaren erabilera tirada txikiko ekoizpen-kasuetarako oso egokia da eta beraz baita sektore honetarako ere. Hala, FGko teknikak geometria konplexuak sortzeko duten gaitasunak, erreminten, tresnen edo moldeen errendimendua hobetu dezake. Gainera, aukera ona izan daiteke material garestizko piezetan galera handiak agertzen diren kasuetarako.

-Eraikuntzaren sektorea: Eraikuntzaren sektorean, azken hamar urtean baino gehiagoan, eredu arkitektonikoak fabrikazio-gehigarriaren bidez

fabrikatu izan dira. Gainera, azken urteetan asko handitu dira eraikuntzako osagaiak fabrikatzeko, hormigoian edo zementuan inprimatzeko metodoei buruzko ikerketak, eta fabrikazio-gehigarria aplikatzen duten lehenengo eraikuntza-proiektuak azaldu dira [Paolini, 2019] [Craveiro, 2019]. Adibide gisara, MX3D konpainiak Amsterdamen instalatu den diseinu optimizatua daraman altzairu herdoilgaitzez egindako zubi bat fabrikatu du GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez [MX3D, 2021].

Fabrikazio-gehigarria Laugarren Industria Iraultzaren zati izango dela esaten da. Horri, Industria 4.0 ere deitzen zaio, eta fabrikazio malguagoa, aldakorragoa, pertsonalizagarria eta azkarragoa bilatzen du.

Hala ere, gaur egun oraindik zenbait alderdi hobetu behar dira fabrikazio-gehigarria, prozesu industrial erreal eta lehiakor bat izan dadin. Ikuspegi teorikoa behar da fabrikazio-gehigarria industria-ekoizpeneko sistemetan nola erabil daitekeen hobeto ulertzeko [Eyers, 2017]. Masako ekoizpen-prozesuetan, adibidez, fabrikazio-gehigarriak mugak ditu, fabrikazio-abiadura eta errepikakortasuna txikiak baitira. Horrela, teknika horiek orain arte pieza bakarrak fabrikatzeko eta konponketa-aplikazioetarako erabili izan dira, baina, gaur egun, benetako ekoizpen-kateetan sartzea da erronka. Gainera, prozesu-parametroen optimizazioa eta hautaketa egokia eta kontrol- eta monitorizazio-sistemen erabilera funtsezkoak izango dira teknologia-mota horien erabateko kontrola izateko.

2 Fabrikazio-gehigarri metalikoaren barneko sailkapena

Fabrikazio-gehigarriaren barruan, teknologia mota bakoitza energia-iturri baten, materialaren formatuaren eta sistema mugikor baten konbinazio berezi bat da, bakoitza aplikazio jakin baterako egokia izanik. ASTMk (ASTM F2792) sortutako terminologia estandarraren arabera, fabrikazio-gehigarriko teknologiak zazpi kategoriatan sailkatzen dira [ISO/ASTM, 2015], eta lehenengo laurak metalezko osagaiak fabrikatzeko erabil daitezke [Zhang, 2018-b]:

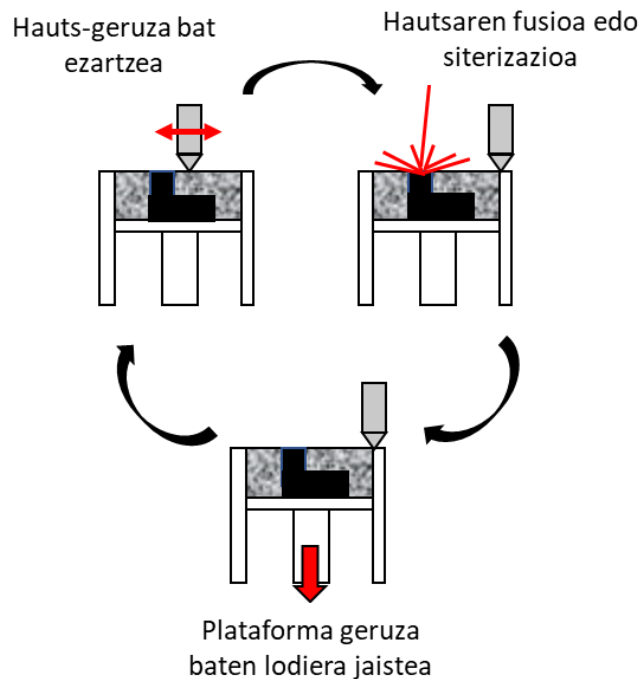
1. Hauts-ohearen fusioa (*Power Bed Fusion, PBF*)
2. Binder Jetting (BJ)
3. Sheet Lamination (SL)
4. Energiaren ezartze zuzena (*Directed Energy Deposition, DED*)
5. Material Extrusion (ME)
6. Material Jetting (MJ)
7. Estereolitografia (*Vat Photopolymerization, VP*)

Material metalikoei dagokienez, hainbat fabrikazio-teknika tradizional daude. Ohikoenak galdaketa, forjaketa eta mekanizazioa dira, eta horiek dira oraindik ere munduko metalen industriaren zutabe nagusiak. Material mota horien fabrikazio-gehigarria, berriz, nahiko berria da (80ko hamarkadako), eta geruzaz geruzako produkzioan oinarritutako teknika automatizatuak eskaintzen dituzte. Hasiera batean, halako teknologiak prototipo azkarrak egiteko garatu baziren ere; egun fabrikazio-gehigarriko teknologien eskaria asko handitu da tirada txiki eta ertainak dituzten eta ingurumen- eta ekonomia-ezaugarri hobek eskaintzen dituzten ingeniaritzako osagai errealeko fabrikaziorako.

Gaur egun, material metalikoetan oinarritutako fabrikazio-gehigarriko teknikek material eta energia asko aurrezten laguntzen dute, hainbat piezaren fabrikazioaren kostua eta ingurumen-inpaktua murriztuz. Gainera, teknika horiekin geometria konplexudun piezak egin daitezke (ohiko fabrikazio-teknikekin fabrikatu ezin direnak) eta balio erantsi handiko piezak konpontzea ere posible da. Hala, zehaztasun geometriko handiko piezak lor daitezke, propietate mekaniko egokiak mantenduz.

2.1 Hauts-ohearen fusioa (*Power Bed Fusion, PBF*)

Teknologia mota honen barruan sailkatzen dira 3D pieza bat sortzeko asmoz hauts-materialetik abiatuta geruzaz geruza hauts hori fusionatzen duten metodoak. Oro har, mota horretako teknologien oinarritzko printzipioa energia-iturri batek (laser izpi batek edo elektro-sorta batek) emandako energia termikoa erabiltzea da hauts-ohearen eremu selektiboak fusionatzeko edo sinterizatzeko. Prozesuan zehar, lehenik eta behin, arrabola baten bidez lehenengo hauts-geruza zabaltzen da fabrikazio-plataformaren gainean. Ondoren, energia-iturria erabiliz eskaneatu egiten da eta hala, hauts-partikulak solidotu egiten dira geruza horretan fabrikatu beharreko piezak duen geometriaren arabera [Cook, 2020]. Jarraian, fabrikazio-plataforma geruza baten lodiera jaitsi eta gainean arrabolaren bidez beste hauts-geruza bat zabaltzen da. Prozesu hori errepikatzen da objektua erabat fabrikatuta izan arte, II-1. irudian ikus daitekeen bezala [Bhavar, 2014]. Pieza bukatutakoan, hauts-ohetik atera eta behar diren postprozesuak burutzen zaizkio.



II-1. irudia. Hauts-ohearen fusio (PBF) teknologien errepresentazioa

PBF multzoaren barruan sailkatutako teknologiak zabalduenak dira fabrikazio-gehigarri metalikoaren barruan hainbat sektore industrialetan, hala nola, industria biomedikoan, industria aeroespazialean eta industria aeronautikoan [Singh, 2019], laser izpiak edo zehaztasun handiko elektro-sortak erabiliz pieza geometrikoki konplexuak fabrikatzeko duten gaitasunagatik [Chin, 2020]. Gainera, teknologia horiekin posible da gainazal-akabera egokiko piezak eta geometrikoki zehatzak lortzea, pieza txiki eta ertain konplexuak lortzeko oso erabilgarriak izanik. Hala ere, hauts-ohearen teknologiek muga handiak dituzte tamainari eta produktibitateari dagokienez; izan ere, ezarpen-tasak nahikoa txikiak dira (gehienez $150 \text{ cm}^3/\text{h}$), eta fabrikatu daitezkeen piezen tamaina makinen lan-eremuaren tamainak mugatzen du [Bhavar, 2014]. Gainera, teknologia mota horietan kostu operatiboak alderaketan altuak dira, lehengaien eta makinen kostu handiagatik, hauts metalikoak birziklitzeko arazoengatik, material aldaketa zailengatik eta babes-gasen gestiorako eta segurtasunerako instalazioen eskakizunengatik. Prozesu horien beste ezaugarri nagusi bat teknologia makina-fabrikatzaile nagusien (EOS, GE Additive, Renishaw, SLM solutions, etab.) esku dagoela izan ohi da, irtenbide itxi bat eskaintzen dutelarik, erabiltzaileak makina jasotzeaz gain, materiala, teknologia, softwarea eta abar ere jasotzen baititu. [Udroiu, 2012].

PBF multzoak hainbat teknologia barne hartzen ditu, hala nola, laser bidezko fusio selektiboa (*Selective Laser Melting, SLM*) eta elektro-sorta bidezko fusioa (*Electron Beam Melting, EBM*). Prozesu horien ezaugarri nagusiak II-1. taulan

laburbiltzen dira. SLM eta EBM prozesuek antzeko lan-printzipioak dituzte, biek ala biek geruzaz geruza urtzen dute hautsa, laser edo elektro-sorta baten bidez, hurrenez hurren. Gainera, EBMk hutsa duen lan-eremu bat behar du lan egiteko eta, aldiz, SLMk atmosfera babestua soilik [Dev Singh, 2020].

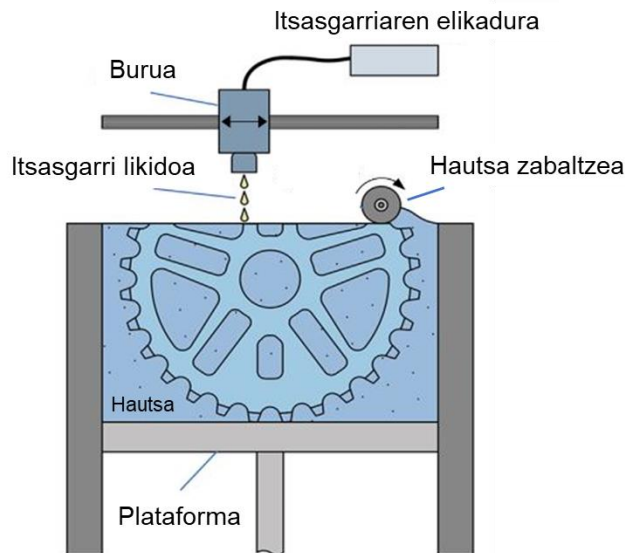
II-1. taula. SLM eta EBM teknologien ezaugarri nagusiak

	SLM	EBM
Energia-iturria	200-1000 W-ko fibrazko laser bat edo gehiago	3000-6000 W-ko potentzia altuko elektro-sorta
Lan-eremuko atmosfera	Atmosfera inerteia	Hutsa
Hautsaren aurretiko berotzea	Plataformaren aurretiko berotzea	Eskaneatze bidez
Euskarri beharra	Bai	Ez
Fabrikazio-bolumen maximoa (mm)	800x400x500 [GE Additive, 2021-a]	350x430 (Ø x H) [GE Additive, 2021-b]
Ezarpen-tasa maximoa (cm³/h) [Bhavar, 2014]	20-150	80
Geruzaren lodiera (µm) [Singh, 2019]	20-150	50-200
Gainazal-akabera (µm) (Ra) [Bhavar, 2014], [Gokuldoss, 2017], [Herderick, 2011]	4-11	25-35
Tolerantzia geometrikoa (mm) [Bhavar, 2014], [McWilliams, 2017]	±0,05-0,1	± 0,2
Fabrika daitekeen detaile tamaina txikiena (µm) [Bhavar, 2014]	40-200	100

2.2 Binder Jetting (BJ)

Binder Jetting prozesuak bi material erabiltzen ditu: hauts eran dagoen materiala eta aglutinatzailea. II-2. irudian ikus daitekeenez, inprimaketa prozesuan likido aglutinatzailea hauts-ohearen gainean ezartzen da. Horretarako, inprimaketa-burua horizontalki mugitzen da, fabrikatu beharreko piezaren forma geometrikoa deskribatuz, eta aglutinatzaileak hauts-geruzen arteko itsasgarri gisa jarduten du. Ondoren, fabrikazio-plataforma geruza baten lodiera jaisten da, PBF prozesuetan bezala eta arrabola baten bidez hurrengo hauts-geruza zabaltzen da aurrekoaren gainean. Prozesua hori piezaren azken geometria lortu arte errepikatzen da. Berotutako lan-eremu batek inprimaketa prozesua bizkortzen lagun dezake materialen biskositatea handitzen baitu [Karlsson, 2019].

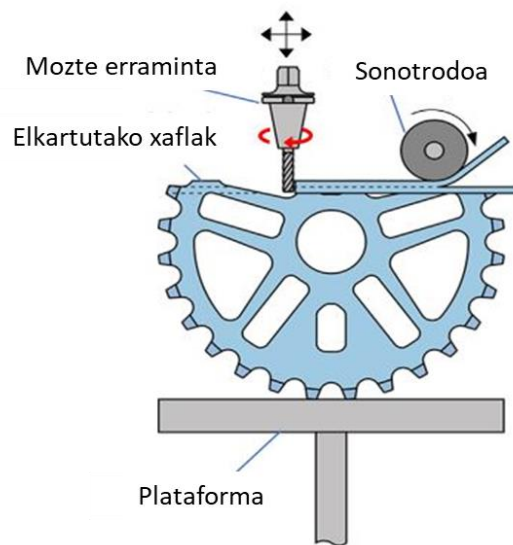
Merkatuan BJ prozesurako hautsak material askotan daude eskuragarri, hala nola, material metalikoetan, polimeroetan eta material zeramikoetan [Kunchala, 2018]. Bestalde, *Binder Jetting* makinaren fabrikazio-bolumena, fabrikazio-gehigarriko teknologia guztien artean, merkatuko handien artean dago (800 x 500 x 400 mm arte) [ExOne, 2021].



II-2. irudia. Binder Jetting prozesuaren adierazpen eskematikoa ([Pragana, 2021] lanetik egokitua)

2.3 Sheet Lamination (SL)

SL teknologiek material-xaflak erabiltzen ditu hiru dimentsioko objektuak fabrikatzeko. Teknologia horietan guztietan, xaflak nahi den objektuaren formarekin mozten dira, eta, gero, nolabait, elkartu egiten dira hiru dimentsioko pieza bat lortzeko, II-3. irudian ikus daitekeen bezala [Bhatt, 2019]. Xaflen materialaren arabera, SL teknologia desberdinak bereiz daitezke, hala nola, *Laminated Object Manufacturing* (LOM) polimeroentzat, *Composite Based Additive Manufacturing* (CBAM) konpositeentzat eta *Ultrasonic Additive Manufacturing* (UAM) metalentzat. Teknologia mota horien onuretako batzuk abiadura handia, kostu txikia eta materiala erabiltzeko erraztasuna dira.



II-3. irudia. Sheet Lamination prozesuaren adierazpen eskematikoa ([Pragana, 2021] lanetik egokitua)

2.4 Energiaren ezartze zuzena (*Directed Energy Deposition, DED*)

DED prozesuak gero eta garrantzia handiagoa hartzen hari diren prozesuak dira, duela 15 urte ingurutik garapen eta industrializazio fasean daudelarik. DED multzoaren barruan, energia-iturriak materiala elikatzen denaldi berean urtzen duen teknika guztiak sartzen dira [Lee, 2017]. PBF teknologiek alderatuta, teknologia mota honen abantaila nagusiak, fabrikazio-bolumen handiagoak izanik pieza handiagoak fabrikatzeko aukera eta kaltetutako piezak konpontzeko aukera dira [Saboori, 2019].

Prozesu mota honetan, piezaren azken geometriatik oso gertu dagoen aurreforma bat lortzen da, mekanizatu behar den material kopurua bloke batetik hasita baino askoz ere txikiagoa delarik. Gainera, piezaren hiru dimentsioko diseinu digital batetik zuzenean abiatzen da eta material metalikoa behar den tokian eta kantitatean urtu eta ezartzen da, geometria geruzaz geruza sortuz. Orain gutxi fabrikatutako pieza batzuetan jada frogatu da materialean, kostuan eta energia-kontsumoan %70etik gorako aurrezkiak lor litezkeela eta entrega-epaek nabarmen murriz daitezkeela fabrikazio konbentzionalarekin alderatuta [Vimal, 2020].

DED teknologien barruan, bi prozesu mota bereizten dira: Hari-elikatzedun deposizioa [Ding, 2015-b] eta hauts-elikatzedun deposizioa [Frazier, 2014]. Hautsaren ordez lehengai gisara haria erabiltzeak kilogramoko prezioa murrizten du, materialaren erabileraren eraginkortasuna handitzen du, hautsak birziklatzeko sistemen beharra murrizten du, prozesua ingurumenerako atsegina

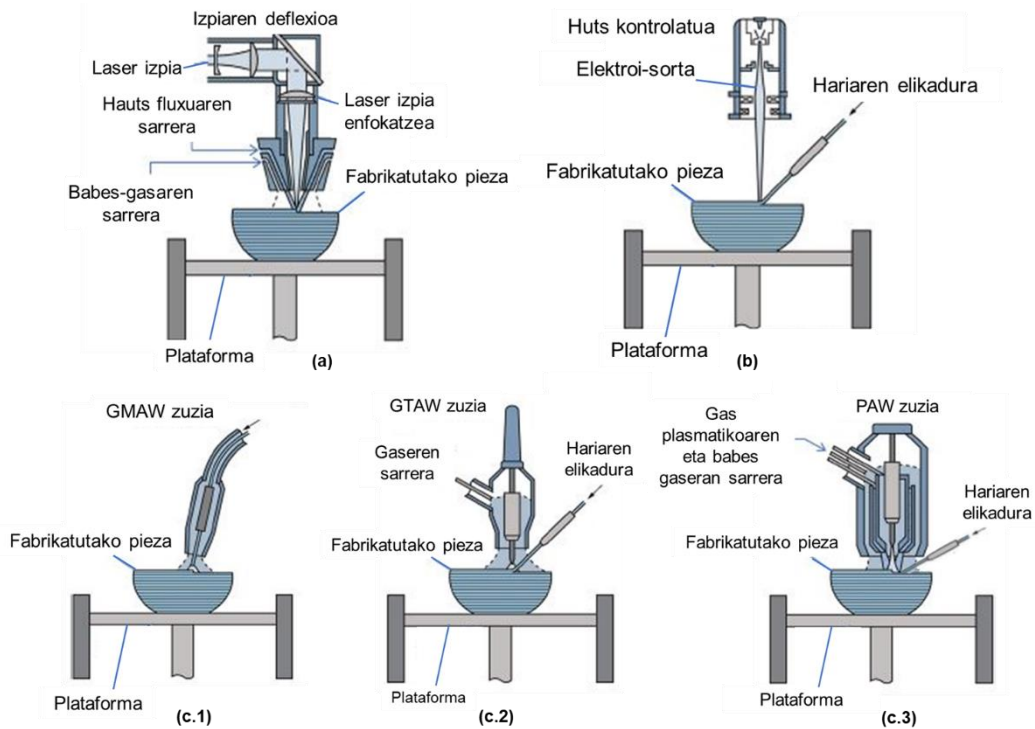
bihurtzen du eta langileek segurtasun eta osasun kezkarik gabe materiala erraz manipulatzeko aukera ematen du [Wang, 2019] [Jin, 2020].

Materiala urtzeko energia-iturri gisara laser bat, elektroi-sorta bat edo arku elektriko bat erabil daitezke. Hala, energia-iturriaren zuzia eta materiala elikatzeke ekipamendua sistema mugikor batean (beso robotiko bat, Gantry makina bat, makina kartesiar bat, etab.) muntatzen dira eta, horren bidez, nahi den materiala nahi den lekuan ezartzen da [Herzog, 2016]. Horregatik, teknologia mota horietan ez da ohikoa konponbide itxiak eskaintzen dituzten makina-saltzaileak aurkitzea.

Bestalde, DED kategoriaren barruan hainbat prozesu mota bereizten dira, energia-iturriaren izaeraren eta sartutako materialaren formatuaren arabera, II-4. irudian ikus daitekeen bezala: LMD (*Laser Material Deposition*), EBAM (*Electron Beam Additive Manufacturing*) eta WAAM (*Wire Arc Additive Manufacturing*) [Pragana, 2021].

Teknologia mota horietan energia eskualde jakin batera bideratzen da oinarri-materiala (substratua) edo aurretik ezarritako materiala berotzeko eta utzi beharreko materiala urtzeko. Prozesuaren zehaztasuna erabiltzen den energia-iturri motaren arabera da (laser>elektroi-sorta>arku elektriko) [Lee, 2017]; fabrikazio-abiadura, ordea, ezarpen-tasarekin lotuta dago (LMD 1 kg/h < EBAM 10 kg/h < WAAM 10 kg/h).

Gainera, laserrak duen eraginkortasun energetikoa murrizta da (%35 gehienez), elektroi-sortarena apur bat txikiagoa da (%15-20), baina arku elektrikoarekin ezin da alderatu, zenbait egoeratan %90era irits baitaiteke [Ding, 2015-a]. Laserrak erabiltzen dituzten teknikekin alderatuta, arku elektriko materiala urtzeko energia-iturri eraginkorragoa da, batez ere, aleazio metaliko islatzaileetan, hala nola, aluminio-aleazioetan, kobreak eta magnesioan [Cunningham, 2018].



II-4. irudia. DED teknologien adierazpen eskematikoa: a) LMD teknologia; b) EBAM teknologia; c) WAAM teknologia. c.1) GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua; c.2) GTAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua; c.3) WAAM teknologian oinarritutako PAW prozesua ([Pragana, 2021] lanetik egokitua)

LMD teknikan, hauts metalikoa ahoko koaxial jarraitu, lateral edo multi-jet baten bidez elikatzen da [Jardon, 2020], eta lente sistemaz zuzendutako egoera solidoko laser baten (Nd: YAG), zuntzeko laser baten, diodozko laser baten edo 1-5 kW potentziadun CO₂-zko laser baten bidez urtzen da (II-4 a. irudia) [Azarniya, 2019]. Teknologia honetan, metala errektiboa bada, bainu urtua babes-gas noble batek babestuko du, haren oxidazioa saihesteko.

Materiala elikatzen eta urtzen den bitartean, piezaren azken geometria lortzeko bi aukera daude: pieza mugitzen da ahokoa geldirik dagoen bitartean, edo ohikoena, ahokoa sistema mugikorraren bidez mugitzen da pieza geldirik dagoen bitartean [Frazier, 2014]. Prozesu hori geruzaz geruza errepikatzen da, hiru dimentsioko pieza bat osatu arte. Teknika horrekin, ahoko motaren eta laser izpiaren tamainaren arabera, posible da bai estaldura zabalak eta bai milimetro hamarren gutxiko xehetasunak fabrikatzea [Kittel, 2020].

Bestalde, **EBAM** teknologian materiala hari formatuan elikatzen da eta elektro-sorta baten bidez urtzen da (II-4 b. irudia). Teknologia hau 2004an garatu eta merkaturatu zuen lehen aldiz SCIKEY enpresak Boeingekin elkarlanean [Gisario, 2019], [SCIKEY, 2021]. Prozesua hutsean egin behar da, eta, horregatik, ezin

dira hauts metalikoak erabili, hutsean hauts metalikoen fluxuen manipulazioa zaila baita [Zhang, 2020-a].

Azkenik, **WAAM** teknologian materiala hari formatuan elikatu eta arku elektriko baten bidez urtzen da. WAAM teknika soldadura automatikoaren printzipioetan oinarritzen da, piezak oinarri-material baten gainean fabrikatzen direlarik geruzak gainezarriz [Williams, 2016-b]. Metodo honek material-ezarpen masiborako ahalmena ematen du, 10 kg/h baino gehiagoko ezarpen-tasetara iritsiz, eta laser-hauts sistemen ezarpen-tasa tipikoak (normalean 1 kg/h arte) baino askoz handiagoak lortuz [Ng, 2009]. Horregatik, nahiz eta zehaztasun geometrikoa laserrarena baino askoz txikiagoa izan, arku bidezko ezarpen-prozesuak metalak bolumen handitan ezartzeko metodorik ekonomikoenetako bat dira. Horregatik, WAAM teknologia bereziki egokia da konplexutasun geometriko ertaineko eta tamaina handiko piezak fabrikatzeko.

Gainera, WAAM teknologiak, EBAM prozesuek ez bezala, ez du hutsa behar lan egiteko, eta horrek asko murrizten du ekipamenduaren kostua. Hala ere, soldadura prozesuetan bezala babes-gas batekin babestutako atmosfera lokalizatua behar da material urtua ez kutsatzeko eta material batzuetan atmosfera babestua ere komenigarria litzateke. Bestalde, laserrak erabiltzen dituzten teknikekin alderatuta, arku elektrikoa energia-iturri eraginkorragoa da materiala urtzeko, batez ere, aleazio metaliko islatzaileetan, hala nola, aluminio-aleazioetan, kobreak eta magnesioan [Cunningham, 2018].

Oro har, hauts-ohearen eta DED teknologien ezaugarri nagusien alderaketa II-2. taulan ikus daiteke.

II-2. taula. Fabrikazio-gehirri metalikoko teknologien arteko konparaketa

	PBF [Bhavar, 2014]	DED-LMD [Kittel, 2020]	DED-EBAM [SCIaky, 2021]	DED-WAAM [Tabertero, 2018], [Chen, 2015]
Zehaztasuna	Altua: $\pm 0,05-0,2$ mm	Ertaina: $\pm 0,2$ mm	Amaierako mekanizazioaren beharra	Amaierako mekanizazioaren beharra
Integritate estrukturala	Altua: Huts-ganbera/atmosfera babestua	Altua: Atmosfera babestua	Altua: Huts-ganbera	Altua: Atmosfera babestua
Produktibitatea [Pragana, 2021], [Gisario, 2019]	Baxua: $\sim 0,1-0,2$ kg/h	Ertaina: $\sim 0,5-1$ kg/h	Altua: $\sim 3-11$ kg/h	Altua: ~ 10 kg/h
Pieza tamaina	Makinaren lan eremuaren tamainak mugatua (max. 800 x 400 x 500 mm) [GE Additive, 2021-a]	Handia, makinaren irisgarritasunak mugatua	Handia, makinaren irisgarritasunak mugatua	Handia, makinaren irisgarritasunak mugatua
Konplexutasun geometrikoa	Altua	Ertaina	Baxua-Ertaina	Baxua-Ertaina
Aplikazio industrialak	Pieza konplexuen fabrikazio zuzena	Piezen konponketa, estaldurak, piezen fabrikazio zuzena	Piezen konponketa, estaldurak, piezen fabrikazio zuzena	Piezen konponketa, estaldurak, piezen fabrikazio zuzena
Ekipamendu kostua	Altua	Altua	Altua	Baxua
Lehengaien prezioa	Oso altua	Altua	Baxua	Baxua

Beraz, metodo horien aukerak eta mugak aztertzean (ikusi II-2. taula), metalen fabrikazio-gehigarriko teknikek etorkizun hurbilean gainditu beharreko erronka asko dituztela ondorioztatzen da. Adibidez, prozesuaren aldagaiak kontrolatu behar dira, hala nola, hozte-prozesuaren denbora eta tenperatura, babes-atmosferaren konposizioa eta materialaren solidotze-abiadura.

Izan ere, aldagai horien ondorio dira lortzen diren piezaren azken propietateak, hala nola, mikroegitura, gainazal-akabera, erresistentzia mekanikoa edo nekearekiko erresistentzia. Gainera, kontuan hartu behar dira honako aldagai hauen kontrol eskasaren ondorioak: porositate gisara azaltzen diren akatsak, hondar-tentsio gehiegizkoak, oinarri-materialarekiko atxikidura txikiegia edo propietate mekanikoen galera [Sames, 2016].

Bestalde, gaur egun, kasu askotan, fabrikazio-gehigarri metalikoko teknologiak prototipoen fabrikaziora, balio erantsi handiko pieza txikien ekoizpena eta konponketetara mugatzen dira [Dilberoglu, 2017]. Beraz, fabrikazio-metodo tradizionalak ordezkatzeko eta 4.0 Industriaren oinarritzko elementu bihurtzeko, teknologia horiek dituzten oztopoak gainditu ditzaketela eta masa-ekoizpena egokitu daitezkeela erakutsi beharko dute.

3 WAAM teknologia

3.1 Sarrera

Gaur egun, arku eta hari bidezko fabrikazio-gehigarriko prozesua (*Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM*) fabrikazio-prozesu interesgarri bihurtu da, tamaina handiko eta konplexutasun geometriko ertaineko pieza metalikoak kostu txikiarekin fabrikatzeko aukerari esker [Cunningham, 2018]. Teknologia hori fabrikazio-gehigarri metalikoko teknologien artean sailkatzen da, Energiaren ezartze zuzena (DED) taldearen barruan.

Teknologia honen jatorria 1925an dago, Bakerrek [Baker, 1925] dekorazio-objektuak fabrikatzeko bero-iturri gisara arku elektriko bat erabiltzea proposatu zuenean hari formatuko materiala urtzeko. Ordutik, teknologiak asko eboluzionatu du, batez ere azken hamabost urteetan, gaur egun WAAM bezala ezagutzen duguna izan arte [Derekar, 2018]. Egun, WAAM teknologia fabrikazio-prozesu interesgarri bihurtu da birtualki mugarik gabeko tamaina duten Near net shape (NNS) piezak egiteko material metaliko ezberdinetan, hala nola, titanio-aleazioetan, altzairuetan, nikel-aleazioetan, aluminio-aleazioetan, etab. [Wu, 2018-b].

Bere ezaugarriei dagokienez, WAAM prozesua soldadura automatikoko prozesu baten antzekoa da [Williams, 2016-b]. WAAM teknologiarako behar den

ekipamendua, funtsean, energia-iturri batek, haria elikatzeko sistema automatiko batek, zuzi batek, manipulazio-sistema batek (robot antropomorfitiko batean edo makina kartesiar batean oinarrituak) eta sistema osagarri batzuek osatzen dute, esaterako, babes-gasaren sistemak [Pan, 2018]. Funtsean, prozesu honetan, energia-iturriak haria arku elektriko baten bidez urtzen du eta manipulazio-sistemari esker geruzaz geruza oinarri-materialaren gainean ezartzen du, nahi den aurreforma lortuz.

Prozesuan zehar, atmosferako gasen ondorioz materialaren kutsadura saihesteko eta oxidoen, nitratoen edo beste ezpurutasun batzuen agerpena gutxitzeko, bainu urtua emari egokia duen babes-gas batekin babesten da. Gasaren emaria handiegia bada, gehiegizko gasak porositatea eta penetrazio txikia eragin ditzake, bainu urtuan sortutako turbulenzien ondorioz. Gainera, gas horren konposizioa garrantzitsua da, beroaren transferentzian eragiten baitu [Cunningham, 2018]. Rodrigues et al.-ek [Rodrigues, 2019-b] babes-gasaren eta emari desberdinen eragina aztertzen zuten hainbat lan laburbildu zituzten, eta ondorioztatu zuten parametro horiek batez ere fabrikatutako piezen propietate mekanikoei eta itxura geometrikoari eragiten zirela. Ikerketa honek, lan honetan aipatutako beste lan batzuek bezalaxe, parametroen aukeraketan eta prozesuan berauek duten eraginaren garrantzian foku berezia ezartzen du.

Fabrikazio-gehigarriaren ondoriozko aurrerapen handia, gaur egun industrian erabiltzen diren fabrikazio-metodoak, esaterako, mekanizazioa, forjaketa, galdaketa eta soldadura, ordezteagatik edo horiekin konbinatzeagatik etorriko da. Kasu honetan, material metalikoen fabrikazio-gehigarriaren inpaktua askoz ere handiagoa izango da, merkatu-segmentu zabalagoetan erabiltzeko aukera baitago.

Aurrerapen hori posible izango da baldin eta soilik fabrikazio-gehigarriko sistema komertzialek osagaien fabrikazio-kostu askoz txikiagoak, ezarpen-tasa altuagoak eta fabrikazio-bolumen handiagoak eskaintzen badituzte. Fabrikazioaren kostua bi faktoreen mende dago nagusiki: produktibitatea, ezarpen-tasari lotua eta *buy-to-use* ratioa, fabrikazio-gehigarriko prozesuen ondoren ezabatu beharreko material kopurua adierazten duena. Cranfield-eko Unibertsitateak egindako ikerketa batek bi faktore hauen arteko erlazioa erakusten du; ezarpen-tasa handitzean, *buy-to-use* ratioa murrizten da [Williams, 2016-a]. Horregatik, azken horien arteko oreka WAAM prozesuen eraginkortasunaren faktore erabakigarria izango da.

3.2 Abantaila eta desabantailak

Beste fabrikazio-teknika gehigarri batzuekin alderatuta, WAAM teknologiaren abantaila nagusia lortzen dituen ezarpen-tasa altuak dira (1-10 kg/h, materialaren arabera [Cunningham, 2018]) tamaina handiko piezak egin daitezkeelarik. Hala ere, ezarpen-tasaren balio handiak lortzeko, beharrezkoa da hariaren elikatze-abiadura handiak izatea eta horrek ezegonkortasuna sor lezake prozesuan, zimurtasun handiko gainazal-akabera lortzen direlarik. Hori dela eta, oro har, esaten da WAAM prozesu konbentzionalarekin (ez prozesu hobetuekin: GMAW-HW, GMAW Tandem, etb.) ez dela gaintu behar 8 kg/h-ko ezarpen-tasa altzairuetan eta 1 kg/h-ko titanio eta aluminio-aleazioetan, [Williams, 2016-b], bestela, ondorengo mekanizazio-prozesuak luzeegiak lirakeelako.

WAAM teknologiaren beste abantaila aipagarri batzuk ere badaude:

- Ezarritako materialaren kalitatea oso altua da, akatsik gabea eta propietate mekaniko onekin [Cunningham, 2018] [Sames, 2016].
- Erlatiboki, hari formatuan dagoen lehengaiaren kostua txikia da eta kalitate egokia du, propietate ziurtatuekin eta materialetan barietate handiarekin [Sames, 2016]. Zehazki, hari formatuko materialaren kilogramoko prezioa, titanio, altzairu eta nikel-aleazioak bezalako ingeniartzako materialetan, hauts formakoa baino baxuagoa da [Cunningham, 2018]. Adibidez, batez beste, fabrikazio-gehigarrirako Ti6Al-4V titanio hautsa, aleazio bereko haria baino %141 garestiagoa da. Bestalde, fabrikazio-gehigarrirako tantalio hautsa tantalio hariaren batez besteko kostua baino %7 garestiagoa da. Era berean, ezberdintasun hau handiagoa da beste material batzuetan, fabrikazio-gehigarrirako 316 altzairu herdoilgaitzeko hautsaren eta fabrikazio-gehigarrirako Inconel 625zko hautsaren kostua hari formatuko material bereko lehengai baino bi aldiz handiagoa da [SCIKEY, 2021]. Gainera, hautsak birziklatzeko sistemen beharra ere murrizten da eta alde batera uzten dira materiala formatu horretan erabilia sortzen diren osasunarekin eta segurtasunarekin erlazionatutako alderdiak.
- Bestalde, ekipamenduaren kostua erlatiboki txikia da, hau da, ez da beharrezkoa kapital handiak inbertitzea sistema bat instalatzeko eta gainera, ekipamenduen hornitzaileen aniztasuna handia da. Izan ere, WAAM teknologiarako beharrezkoa den ekipamendua erraz lor daiteke soldadurako ekipamendua saltzen duen edozein hornitzailearen bidez. Aldiz, beste FGko teknologia batzuetan, hala nola, EBMn, huts-ganbera bat beharrezkoa da eta horrek asko handitzen du ekipamenduaren prezioa

- [Cunningham, 2018]. Gainera, mantentze-lanen kostua txikia da, ekipamenduetan ez baitago laserren optikak bezalako osagai sentikorrik.
- Ezarpen-tasa handiekin lortzen diren ekoizpen-denborak laburrak dira [Pan, 2018]. Ohiko mekanizazio teknikekin alderatuta, WAAM teknologiarekin ekoizpen-denborak %40-60 murriz daitezke eta postprozesu-denborak, berriz, %15-20 piezaren tamainaren arabera [Wu, 2018-b].
 - WAAM teknologiari esker, amaierako geometriatik gertu dauden piezak lor daitezke (NNS prozesutat hartzen da) eta lehengaiaren aprobetxamendu-tasa oso handia da. Hala ere, WAAM teknologiaren bidez fabrikatutako piezek ia beti mekanizazio-etapa bat behar izaten dute azken akabera lortzeko. Etapa horretan, ezarritako materialaren zehaztasun geometrikoa eta gainazal-akabera hobetzen dira. Hala ere, materialaren erabilera-efizientzia WAAM teknologian oso handia da, %90etik gorakoa [Liberini, 2017] eta %75etik gora akaberako mekanizazioa kontuan hartzen bada. Adibidez, duela gutxi, aireontzi baten lurreratze-tren baten mihiztadurak fabrikatu ziren WAAM teknologiaren bidez, erabilitako lehengaiaren kopurua %78 murriztuz ohiko mekanizazio teknikekin alderatuta [Williams, 2016-b].
 - Gainera, arku bidezko ezarpen-prozesuen eraginkortasun energetikoa bere lehiakideena (laserra edo elektro-sorta) baino askoz ere handiagoa da (%90) [Liberini, 2017]. Teknologia konbentzionalen aldean, WAAM teknologiak gutxieneko material kantitatea ezartzen eta prozesatzen du, materiala eta energia nabarmen aurreztuz.
 - Azkenik, WAAM prozesuak ez du ingurumen-inpaktu handirik sortzen [Wu, 2018-b], batez ere, lehen esan bezala, energetikoki oso eraginkorra delako eta bigarrenik, WAAM prozesuak materialaren erabilera oso eraginkorra egiten duelako.

Aurrez azaldutako abantaila guztiek WAAM teknologia etorkizun handikoa dela adierazten badute ere, teknologia honek oraindik erronka asko ditu gainditzeko. WAAM teknologia erabiltzeko oztopo nagusietako bat, geruzaz geruza fabrikatutako piezetan akabera-eragiketak egiteko beharra da. WAAM prozesua fabrikazio-etapa bat baino ez da; pieza gehienek beste postprozesu-etapa batzuk ere behar dituzte, dela mekanizatua, leundua, tratamendu termikoak, etab. Zimurtasuna, porositatea, mikroegitura eta lortutako hondar-tentsioak desberdinak dira WAAM prozesu mota bakoitzerako eta erabilitako material bakoitzerako. Beraz, aplikazio bakoitzak postprozesatu mota bat eskatuko du.

Lehenik eta behin, WAAM prozesuaren zehaztasun geometrikoa ez da bikaina (fabrikatu daitezkeen hormarik finenak 2,5-3 mm artekoak dira) eta, gainera,

lortutako gainazal-akaberak ez dira onargarriak aplikazio batzuentzat [Horgar, 2018]. Adibidez, 1-2 mm-ko geruza altuera tipikoekin, gainazal-akabera tipikoa $R_a=500 \mu\text{m}$ -koa da [Williams, 2016-b], eta azken hori oso tamaina txikiko piezetan WAAM teknologia erabiltzeko faktore erabakigarria eta murriztailea izan daiteke. Lortzen den gainazaleko kalitate baxua konpontzeko eta piezek perdoi geometrikoak errespetatzen dituztela ziurtatzeko, ia beti aurreikusten da azken mekanizazio-postprozesatu baten beharra.

Bigarrenik, amaierako mekanizazioaz gain, WAAM bidez fabrikatutako piezei aplikatu beharreko tratamendu termikoak ere aipatu behar dira, prozesu honetan arku elektrikoa erabiliz piezak geruzaz geruza ezartzeak ziklo termikoak sortzen baititu metal solidotuan eta oinarri-materialean. Zehazki, prozesuaren bero-ekarpenak urtze partziala eta tratamendu termikoak eragiten dituzte aurreko geruzetan [Derekar, 2018]. Hori dela eta, piezek estres termiko handia jasaten dute, eta ondorioz, hondar-tentsioak sortzen dira, tratamendu termikoen bidez askatu behar direnak. Azterketa batzuetan, tratamendu termikoez gain, geruzen arteko hozte behartua edo askea erabili izan da arazo horri irtenbidea emateko [Pan, 2018]. Adibidez, ondo dokumentatuta dago tratamendu termikoez mikroegitura eta propietate mekanikoak hobetzen dituztela Inconel 718n eta Ti6Al4Vn [Dhinakaran, 2020]. Gainera, WAAM bidez fabrikatutako Ti6Al4V materialean, Martina et al.-ek [Martina, 2015-b] ondorioztatu dute postprozesu gisara azaleko ijezketa aplikatuz, alea findu daitekeela eta mikroegitura kolumnarretik ekiaxialera alda daitekeela.

Azkenik, WAAM bidez fabrikatzen diren piezek, prozesu parametro egokiak aukeratzeko ez badira, barneko edo kanpoko akatsak izan ditzakete, hala nola, poroak, betetze-faltak, akabera ez egokiak eta arrakalak [Geng, 2017], [Xiong, 2018]. Gainera, teknologia honetarako CAD sistemak oraindik guztiz garatu gabe daude eta monitorizazio- eta kontrol- sistemak urriak dira [Pan, 2018].

Horregatik guztiagatik, kontuan izan behar da beste fabrikazio-gehigarriko prozesu batzuek arreta handiagoa jaso dutela azken urteotan. WAAM prozesuak etorkizunera begira potentzial handia badu ere, oraindik hainbat alderdi garatu behar dira teknologia horren garapen osoa eman ahal izateko, hasierako diseinutik hasi eta piezen kalitatearen azken egiaztapeneraino.

Bai distortsio termikoak murrizteko, bai gainazaleko akabera onargarriak eta tolerantzia geometrikoak mantentzeko, material bakoitzerako hautatutako parametroak funtsezkoak dira [Horgar, 2018]. Soldadu-kordoiaren ezaugarriak ere, hala nola, kordoiaren geometria, penetrazioa, termikoki erasandako eremuaren sakonera, etab., prozesu-parametroen arabera dira. Horien artean, honako hauek dira garrantzitsuenak: hariaren elikatze-abiadura (*Wire*

Feed Rate, WFR), bero-ekarpena (*Heat Input, HI*), hariaren diametroa, aitzinamendu-abiadura (*Travel Speed, TS*), arkuaren forma, Stick-outa (soldadura-zuziaren ahotik haria ateratzen den distantzia), erabilitako gasaren konposizioa eta emaria eta ezarpen-sekuentzia eta ibilbidea [Nagesh, 2002].

3.3 WAAM teknologia motak

Soldadura-iturriaren izaeraren arabera, hiru WAAM prozesu mota bereizten dira: 1) *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) teknologian oinarritutako WAAM prozesua [Horgar, 2018], 2) *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) teknologian oinarritutako WAAM prozesua [Qi, 2018] eta 3) *Plasma Arc Welding* (PAW) teknologian oinarritutako WAAM prozesua [Jia, 2020]. GMAW (II-4 c.1. irudia), GTAW (II-4 c.2. irudia) eta PAW (II-4 c.3. irudia) prozesuak soldadura-prozesuak dira, bakoitza bere ezaugarri eta aplikazioekin. Prozesu horietan, arku elektriko baten bidez urtutako materiala oinarri-materialaren gainean ezartzen den heinean, soldadura-kordioak eratzen dira, eta geruzaz geruza kordoi horiek gainjarrita, geometria anitzeko piezak egin daitezke [Veiga, 2020]. Ezarpen-prozesu mota aukeratzea materialaren eta fabrikatu beharreko geometriaren arabera da. Hala, PAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua da titaniozko tamaina ertaineko piezak fabrikatzeko aukerarik egokiena, lortutako propietate mekaniko altuak eta kutsadura arrisku txikia direla eta. Bestalde, ezarpen-tasa handiak behar dituzten pieza handien kasuan, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua izango litzateke aukerarik egokiena altzairuzko eta aluminiozko piezak fabrikatzeko [Singh, 2020]. Azkenik, GTAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua 3-5 mm inguruko horma finak egiteko erabiltzen da.

3.3.1 GTAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua

GTAW eta PAW prozesuek kontsumigarria ez den tungstenozko elektrodo bat daramate eta baita haria ez-koaxialki elikatze sistema bat ere. Sistema honen bidez gainera ezarritako materialaren kalitatea ziurtatzeko haria orientatu behar da [Wu, 2018-b]. Hori eragozpen bat da, piezen fabrikazioaren programazioa asko zailtzen baitu [Singh, 2020].

GTAW prozesuan, II-4 c.2. irudian ikusten den bezala, arkua elektrodoaren eta oinarri-materialaren edo piezaren artean sortzen da eta bainu urtua babes-gas noble baten bidez babesten da, normalean argona edo helioa, material urtuaren inguruan babes-atmosfera bat sortuz [Wu, 2018-a]. Teknologia honetan ez da proiektiorik sortzen eta egokia da horma meheak dituzten piezak fabrikatzeko.

3.3.2 PAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua

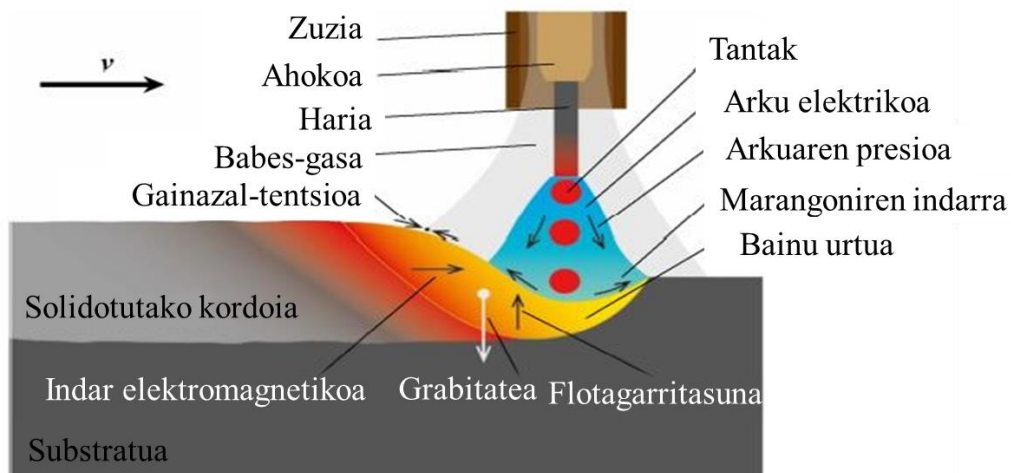
PAW prozesuan, II-4 c.3. irudian ikusten den bezala, GTAW prozesuan ez bezala, bi gas erabiltzen dira: zuziaren gorputzaren barruan dagoen tungstenozko elektrodoa inguratzen duen gas plasmatikoa eta bainu urtua babesten duen gas babeslea. Bi gas horiek hodi bereizietatik doaz eta arku elektrikoari esker gas plasmatikoa ionizazioa bultzatzen da. Horrela, plasma zuziaren ahotik irteten da eta arku elektrikoak uzkuertzen du, oinarri-materialera tenperatura oso altuak lor ditzakeen zurrusta kontzentratua zuzenduz.

Prozesu horretan lortutako dentsitate energetikoa eta tenperaturak GTAW prozesuan lortutakoak baino askoz handiagoak dira eta termikoki kaltetutako eremua askoz txikiagoa da. Horrela, PAW teknologiarik esker, kalitate handiko soldadura-kordioak lor daitezke, piezaren distortsio txikiagoarekin, egonkortasun handiko prozesua lortuz [Singh, 2020].

Plasma-arku bidezko ezarpenak propietate mekaniko onenak eskaintzen ditu, batez ere titanioa bezalako aleazio aeronautikoetan [Artaza, 2020-b]. Adibidez, Artaza et al.-ek [Artaza, 2019] Mn₄Ni₂CrMo altzairuan GMAW eta PAW teknologietan oinarritutako WAAM prozesuen bidez fabrikatutako piezen propietate mekanikoak alderatu zituzten. Haien ikerketak erakutsi zuen bi teknologia horiekin, forjaketa bidez lortzen diren propietate mekaniko estandarrak baino hobekiago lortzen direla. Hala ere, ondorioztatu zuten PAW teknologiarekin GMAW teknologiarekin baino pixka bat propietate altuagoak lortzen direl.

3.3.3 GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua

GMAW prozesuan, haria bera elektrodo kontsumigarria da eta modu koaxialean elikatzen da, II-5. irudian ikus daitekeen bezala. Prozesu horretan, elektrodoaren eta piezaren artean arku elektrikoak eratzen da eta horrela, haria (elektrodoa) urtu eta geruzaz geruza erabakitzen den lekuan ezartzen da. Bainu urtua prozesuan zehar aktiboa edo inerteza izan daitekeen babes-gas batekin babesten da. Gas honen izaeraren arabera, MAG (*Metal Active Gas*) eta MIG (*Metal Inert Gas*) prozesuak bereizten dira.



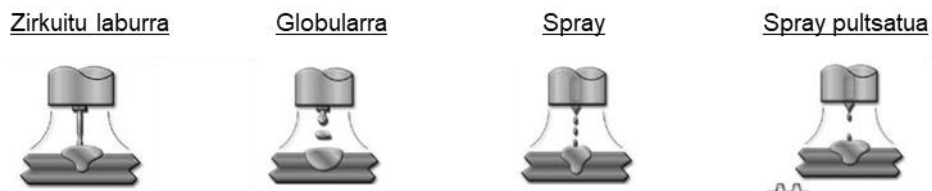
II-5. irudia. GMAW prozesuaren errepresentazio grafikoa ([Hu, 2021] lanetik egokitua)

Hurrengo atalean sakon aztertuko da GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua, baina laburpen gisara WAAM prozesuaren izaera kontuan hartuta eta tamaina ertain eta handiko piezak fabrikatzeko ekonomikoki lehiakorra izan behar duela kontuan hartuta, GMAW prozesuaren abantailarik garrantzitsuena gainerako teknologia gehigarriekin alderatuta lortutako ezarpen-tasa altuak dira.

4 GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua

4.1 Materialaren transferentzia eta funtzionamendu-moduak

Aipatu bezala, GMAW teknologian arku elektrikoa bat eratzen da hari formako elektrodoaren eta piezaren artean. Horrela, metal urtuzko tantak elektrodetik (haria) bainu urtura transferitzen dira. Transferentzia hori hainbat modu ezberdinetan gerta daiteke, hala nola, spray eran, era globularrean edo zirkuitu labur bidez [Kim, 1993] [Ferraresi, 2003] [Scotti, 2014]. II-6. irudian ikus daitezke material transferentzia mota nagusiak.



II-6. irudia. Materialaren transferentzia mota nagusiak

Adibidez, zirkuitu labur bidezko transferentzia bero-ekarpen baxuko prozesua da. Prozesu horretan materiala transferitzen da elektrodoa elektrikoki murriztua denean, hau da, elektrodoaren eta oinarri-materialaren edo bainu urtuaren artean kontaktu fisikoa dagoenean. Lortzen den bero-ekarpen baxuari esker,

transferentzia mota hau oso egokia da xafla finen arteko soldadurarako edo soldadura posizionalerako [Scotti, 2012].

Transferentzia globularrean, bestalde, materiala tanta irregular handietan transferitzen da grabitatearen laguntzaz. Tanta hauek elektrodoak baino diametro handiagoa dute, eta, beraz, euren ezarpena eta metaketa nahikoa erratikoa izan daiteke, zipriztinak eta balizko hutsuneak sortuz [Nassan, 2003].

Aldiz, spray erako transferentzia energia handiko prozesua da, non materiala urrutako tanta uniforme txikien zurrusta baten bidez transferitzen den. Arkuak axialki bultzatzen ditu tanta hauek, ezarpen-tasa handiak lortzen direlarik. Azkenik, spray pultsatu transferentzia modua oso kontrolatua dagoen spray transferentziaren aldaera bat da. Horrelako transferentzia izateko, intentsitate-seinalea pultsukakoa izan behar da, oinarrizko balio batetik maximo batera fluktuatzen duelarik. Hala, intentsitate pulsu bakoitzean material tanta kontrolatu bat transferitzen da elektrodetik bainu urtura [Wu, 2004]. Gainera, transferentzia modu horrekin, transferentzia globularrean eta zirkuitu laburrekoan ohikoak diren zipriztinak, betetze faltak eta fusio osatugabeen ondoriozko akatsak gutxitzen dira [Dos Santos, 2017] [Zheng, 2021].

Azken hamarkadetan, materialaren transferentzia kontrolatzeko, maiztasun altuko kontrol-estrategiak dituzten soldadura-iturriak erabiltzen dira. Funtzionamendu-modu bakoitzak ezarritako kontrol-estrategiek (soldadura-iturri bakoitzak bere funtzionamendu-moduak izan ditzake) hariari aplikatutako intentsitate-seinalearen forma definitzen dute. Intentsitate-seinalearen formak bainu urtuaren dinamikan eta bero-ekarpenean eragiten du, faktore horiek funtsezkoak izanik mikroegitura espezifikoak lortzeko edo akats metalurgikoak saihesteko. Horrelako kontrolak dituzten soldadura-iturriek makina sinergiko deitzen zaie [Subramaniam, 1999].

Beraz, soldadura-iturrien fabrikatzaileek definituta dute urtu beharreko harian aplikatzen den intentsitate-seinalearen forma, funtzionamendu-modu ezberdinak sortuz, esaterako, CMT (*Cold Metal Transfer*) edo Cold Arc, Pulse eta abar. [Selvi, 2018] [Kah, 2013]. Zehazki, doktore-tesi honetan erabiliko diren EWM [EWM, 2021] enpresaren soldadura-iturriek bost funtzionamendu-modu nagusi dituzte: GMAW estandarra, GMAW pultsatua, Cold Arc, Force Arc eta AC pultsatua, bakoitza bere ezaugarriekin.

4.1.1 GMAW estandarra eta GMAW pultsatua

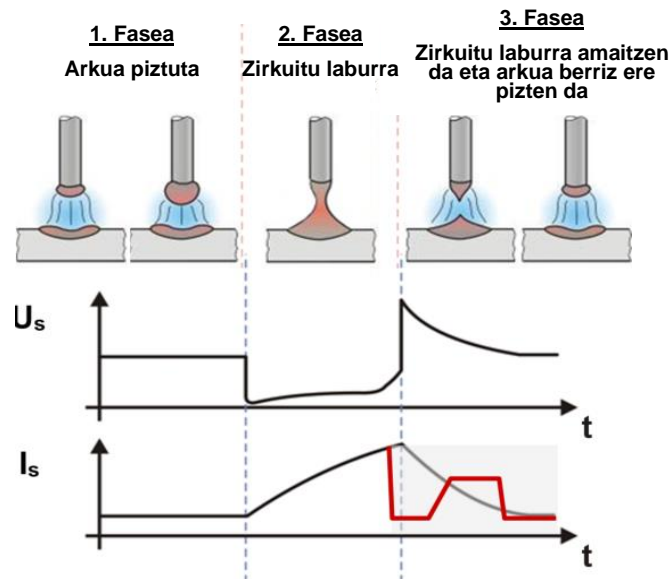
GMAW estandarra deritzon funtzionamendu-moduak ezarpen-tasa altuak ahalbidetzen ditu eta materialaren transferentzia modua globularraren eta Spray erakoaren artean izaten du. Aldiz, GMAW pultsatu moduak, pultsu bakoitzean, modu kontrolatuan, urtutako material tanta bat transferitzen du haritik bainu urtura, ezarpen-tasa altuekin.

Energiaren transferentzia GMAW pultsatuan GMAW estandarrean baino txikiagoa da eta aldi berean, beroaren sarrera ere murriztu egiten da [Dos Santos, 2017] [Liang, 2018]. Horrela, Luo et al.-ek [Luo, 2018] arku pulsatuko eta arku ez pulsatuko WAAM prozesuak aztertu zituzten eta ondorioztatu zuten fabrikazio-eraginkortasuna eta prozesuaren kontrola handiagoak zirela arku pulsatuko WAAM prozesuetan. Gainera, pultsukako prozesuek soldadura ke gutxiago, zipriztin gutxiago eta betetze falta gutxiago sortzen dituzte [Kah, 2013].

4.1.2 Cold Arc

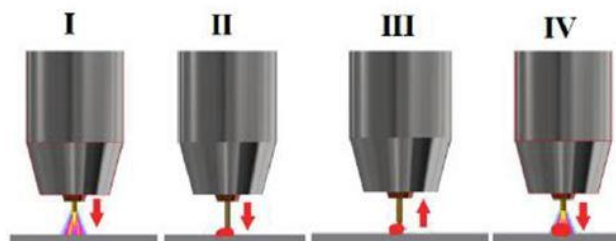
EWM enpresak 2004an diseinatutako eta aurkeztutako Cold Arc moduak materiala modu kontrolatuan transferitzen du zirkuitu laburreko prozesu baten bidez. Prozesu mota hori posible da intentsitate-seinalearen kontrol digital oso azkar bati eta inbertitzaileen konmutazio mota dinamikoki oso azkarrari esker.

Intentsitate-seinalearen prozesadorea, arkua berriro piztu aurretik, hau da, zirkuitulaburraren ondoren, energiaren berehalako erauzketa kontrolatzeko erabiltzen da; une horretan gailur intentsitatea dramatikoki jaisten delarik. II-7. irudian, Cold Arc seinalea zirkuitulaburreko ohiko seinalearekin alderatzen da. Lehenengo bi faseak berdinak dira bi kasuetan, arkua piztuta dago eta elektrodoaren materiala urtuz doa bainu urtura gerturatzen delarik. Elektrodoak pieza ukitzen duen unean, tentsioa ia balio nulura jaisten da zirkuitulaburra gertatzen delarik, intentsitatea bat-batean handitzen den bitartean. Orduan, intentsitatea izugarri murrizten da, metal urtua eta elektrodoaren arteko loturaren haustura leuna ahalbidetzeko, zipriztinik gabe. Berehala, arkua piztu egiten da. Arkua egonkortu ondoren, intentsitatea denbora-tarte labur batez apur bat handitzen da, banaketa erregular bat lortzeko. Gainera, aldi honetan elektrodoaren puntan fusio-kono bat sortzen da, prozesuaren jarraitutasun leuna bermatzeko [Kah, 2013].



II-7. irudia. Prozesuaren errepresentazio grafikoa eta intentsitate eta tentsio-seinaleen forma Cold Arc funtzionamendu-moduan ([EWM, 2021] lanetik egokitua)

Fronius enpresak (Fronius, Austria), bere aldetik, Cold Arc moduaren antzekoa den CMT funtzionamendu-modua garatu zuen, WAAM teknologiarako aktiboki ikertu dena, batez ere aluminio-aleazioen ezarpenerako [Zhang, 2019]. CMT soldadura prozesuak, Cold Arc moduak bezala, zirkuitulaburreko transferentzia modua erabiltzen du [Selvi, 2018]. Sistema honek prozesua kontrolatzen duten abiadura handiko kontrol digitala, inbertsoreak eta prozesadoreak ditu; hauen bidez arkuaren luzera, intentsitatea eta tentsioa erabakitzen direlarik. CMT funtzionamendu-moduak materialaren transferentzia kontrolatzen du elektrikoki lagundutako metodoen bidez, zirkuitu laburraren hastapena eta iraupena erabakiz eta mekanikoki lagundutako metodoen bidez, II-8. irudian ikus daitekeenez.



II-8. irudia. Hariaren elikatze kontrolaren fase nagusiak CMT prozesuan [Prado-Cerqueira, 2017]

Laburbilduz, Cold Arc eta CMT moduetan proiektzioak eta bero-ekarpema minimizatzen dira ohiko GMAW funtzionamendu-moduekin (pultsatua edo estandarra) alderatuta [Shukla, 2020]. Hala ere, prozesu horiek ezarpen-tasa txikiagotara mugatzen dira (altzairuetan 2-3 kg/h, CMT 10 kg/h arte), baina urtu txikiak sortzen dituztelarik [Taberero, 2018].

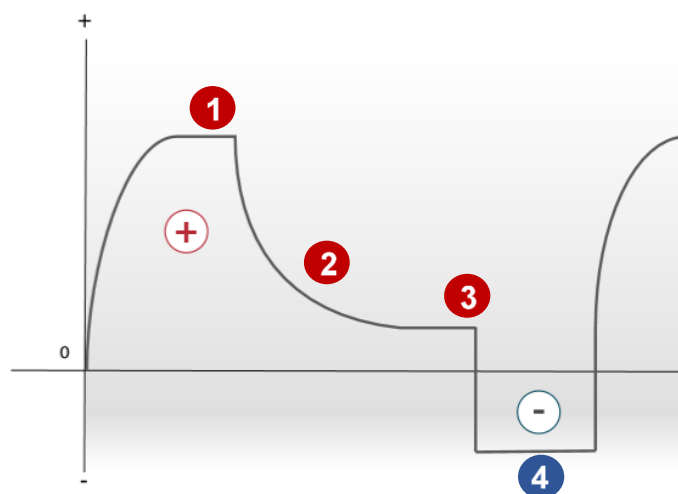
Adibidez, Panchenko et al.-ek [Panchenko, 2020] Cold Arc modua erabili zuten, GMAW autoerregulatu baten ordean, beroaren sarrera %16 murrizteko. Beroa murrizteak material ezartzearen eraginkortasuna hobetzen du eta kordoiaren penetrazioa murrizten du. Horrela, lodiera txikiko hormak egin daitezke ezarpen-tasa txikiagoekin, piezan sartutako bero-ekarpena txikia baita. Azkenik, Derekar et al.-ek [Derekar, 2020] 5183 aluminio-aleazioan, GMAW pultsatua eta CMT funtzionamendu-moduak alderatu zituzten, GMAW pultsatu moduak porositate maila altuagoak lortzen zituela ondorioztatu.

4.1.3 Force Arc

Hirugarrenik, Force Arc funtzionamendu-modua erabiltzen da ezarpen-tasa altuak lortzeko, presio handiko arku boltaikoarekin. Horrela, direkzio-egonkortasun handia eta penetrazio sakona eta kontzentratua duten soldadurak lortzen dira [EWM, 2021]. Sustraien soldaduretarako prozesu egokia da, penetrazio handia eta segurua lortzen baita. Gainera, teknologia honekin angeluko soldaduretan juntura lodierarik handienak soldatzea posible da.

4.1.4 AC pultsatua

Azkenik, AC pultsatu prozesuan, intentsitate-seinaleak polaritate aldakorra du eta ezarpen-tasa handiak lortzen dira. II-9. irudian ikusten denez, fase positiboan tanta sortzen da (1. gunea), 2. gunean tanta askatzen da, 3. gunean oinarri-intentsitatera iristen da eta fase negatiboan (4. gunea) ezarri beharreko haria aurreberotu eta garbitu egiten da. Prozesu honek erredura aztarnarik gabeko soldadura garbiak lortzen ditu xafla finetan, baita AlMg aleazioetan ere. Zehazki, aluminio-aleazioen soldadura ahalmena mugatua izan arren, AC pultsatu prozesua bereziki egokia da soldadura mota horretarako.



II-9. irudia. Intentsitate-seinalearen forma AC pultsatu funtzionamendu-moduan [EWM, 2021]

Hala ere, polaritate aldakorreko intentsitate-seinaleak izateak ez du berritasun handirik, baina ezarpen-tasa handiko prozesuetan horrelako seinaleak erabiltzea garapen berritzailea da. Aurretiko azterlan batzuetan polaritate aldakorreko CMT teknika aurreratuen eragina aztertu izan da. Hain zuzen ere, CMT aurreratua (CMT-ADV) eta CMT aurreratu pultsatua (CMT-PADV) izenekin ezagutzen dira funtzionamendu-modu hauek eta batez ere, aluminio-aleazioen soldadurarako erabili izan dira [Cong, 2017], [Zhang, 2018-a], [Gu, 2014]. Hala ere, CMT teknologiari buruzko azterlan hauetan erlatiboki ezarpen-tasa baxuak erabili izan dira. Aldiz, doktore-tesi honetan AC pulsatu teknika aztertuko da, ezarpen-tasa altuak lortuz, WAAM teknologiari aplikatutako aluminiozko soldaduretan azken berrikuntza izanik.

Adibidez, Gu et al.-ek [Gu, 2014] CMT-PADV prozesua materialaren porositate maila murrizteko modu eraginkorra dela frogatu zuten, polaritate aldakorreko seinaleak aluminiozko piezak fabrikatzeko egokiak direla ondorioztatuz. Gainera, fabrikatutako piezek lortutako erresistentzia eta deformazio plastikoaren balioak egokiak ziren. Hala ere, ezarpen-tasa nahikoa baxua zen kasu honetan: 1,08 kg/h. Gainera, Zhang et al.-ek [Zhang, 2020-b] eta Scotti et al.-ek [Scotti, 2020] CMT-PADV prozesuko polaritate positibo/negatibo erlazioa, intentsitate-seinaleak polaritate positiboa eta negatiboa dituen uneen arteko erlazioa, alegia, aztertu zuten.

4.2 Abantaila eta desabantailak

Arestian aipatu bezala, WAAM teknologiak tamaina ertain eta handiko piezak fabrikatzeko ekonomikoki lehiakorra izan behar duela kontuan hartuta, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua aukera ona da, fabrikazio-gehigarriko beste teknologia batzuekin alderatuta lortzen dituen ezarpen-tasa altuak baitira. Ezarpen-tasa funtzionamendu-moduaren araberakoa da. GMAW pulsatu, AC pulsatu eta Force Arc moduek ezarpen-tasa altuak lortzen dituzte; aldiz, Cold Arc moduak tasa baxuagoak lortzen ditu. Adibidez, altzairuen kasuan, 10 kg/h-ko tasak lor daitezke. Lehengai gisara hauts metalikoak erabiltzen dituzten prozesuekin, SLMrekin (0,6 kg/h) edo LMDrekin (1 kg/h), alderatuz 16 aldiz handiagoak [Tabernero, 2018]. Oro har, erabilitako materialaren eta parametroen arabera, GMAW teknologiaren ezarpen-tasak 1-10 kg/h artean daude [Cunningham, 2018] [Williams, 2016-b], GTAW eta PAW teknologietan oinarritutako WAAM prozesuekin alderatuta 2-3 aldiz handiagoak izanik.

Gainera, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesurako behar den ekipamendua nahiko merkea da eta teknologia mota hau material metaliko askotan erabil daiteke. Adibidez, altzairuzko eta aluminio-aleaziozko piezak ezartzeko oso prozesu egokia da. Automatizatzeko prozesu erraza dela ere

aipatu behar da eta PAW eta GTAW prozesuetan ez bezala, materiala ezartzean, ez da zuzia orientatu behar, diseinu-askatasun handia lortzen delarik. Azkenik, WAAM teknologiaren tamaina-muga oso handia da, teknologia hori Gantry makina batean edo robot antropomorfitiko batean instala baitaiteke geroago zalduko denez.

Hala ere, GMAW prozesua ez da oso egonkorra eta GTAW eta PAW prozesuek baino soldadura ke gehiago sortzen ditu, korrante elektrikoa harian zuzenean sartzen baita [Wu, 2018-b]. Gainera, ezaugarri horrek zipriztinak eta gehiegizko beroketa eragin ditzake eta horrek materialen propietate mekanikoak erasan ditzake.

Gainera, ezarpen-tasa altuak lortzeko, beharrezkoa da hariaren elikatze-abiadura altuak izatea eta horrek ezegonkortasunak sor ditzake prozesuan gainazalean uhin jarriak sortuz. Horregatik, hariaren elikadura-balioak kontrolatu behar dira, gainazaleko akabera-balio onargarriak izateko eta ezarritako piezak eskatzen dituen tolerantziak bermatzeko [Williams, 2016-b]. Hala ere, GMAW bidezko ezarpenaren ondoren, azken mekanizazioa ia beti beharrezkoa izango da behar diren perdoi geometrikoak lortzeko.

4.3 GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuko parametroen nagusiak

Ezarri beharreko hariaren osaera eta babes-gasaren konposizioa aukeratu ondoren, teknologia horren parametro nagusien artean honako hauek daude:

- Elikatutako hariaren diametroa
- Babes-gasaren emaria
- Funtzionamendu-modua
- Hariaren elikatze-abiadura (*Wire Feed Rate, WFR*)
- Aitzinamendu-abiadura (*Travel Speed, TS*)
- Stick-outa
- Ezarpen-estrategia
- Bero-ekarpena (*Heat Input, HI*)

Lehenik eta behin, prozesuan elikatuko den hariaren diametroa zehaztu beharko da. Diametro hori, normalean, 0,8-1,6 mm artekoa izan ohi da. Gainera, aukeratutako materialaren arabera, babes-gasaren konposizioa eta emaria ere aukeratu beharko dira. Ezarpena egokia izateko, gasaren eta ezarri beharreko materialaren arabera, 12-30 l/min artekoak izango dira erabilitako emariak.

Parametro horiek zehaztu ondoren, nahi den funtzionamendu-modua aukeratuko da (4.1 atalean laburtuak) eta hariaren elikatze-abiadura ezarriko da. Bi balio horien arabera, energia-iturriak elikatutako harian sartuko diren eta uhin-forma zehatz bat duten intentsitate-seinaleak sortuko ditu. Gainera, WAAM prozesuaren beste parametro garrantzitsu bat WAAM sistema instalatuta dagoen makinaren aitzinamendu-abiadura balioa da.

Bestalde, Stick-outa (soldadura-zuziaren ahotik haria ateratzen den distantzia) ere zehaztu beharreko parametroa da, eta prozesuan zehar harian sartutako intentsitatean eragina izango du. Azkenik, WAAM prozesuan aukeratu beharreko beste parametro nagusietako bat hurrengo atalean sakontasun handiagoz aztertuko den ezarpen-estrategia da. Horrela, bero-ekarpena prozesuan sartutako energiak eta hautatutako ezarpen-estrategiak zehaztuko dute (4.5 atalean xehetasunez berrikusia) [Nagesh, 2002].

4.4 Ezarpen-estrategiak

GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren produktibitatea eta zehaztasun geometrikoa hobetzeko helburuarekin, lehenago publikatutako hainbat lanetan ezarpen-estrategia desberdinak erabiltzea proposatu da, esaterako, gainjartze-estrategia, oszilazio-estrategia edo matrize-estrategia. Gainjartze-estrategia kordoi zuzenak bata bestearekin gainjartzen dituena da, nahi den eremua materialez estaltzeko. Oszilazio-estrategian, bestalde, eremu hori estaltzeko, sistema mugikorrek oszilazio- edo *weaving*-estrategia bat deskribatzen du. Gainjartze-estrategiaren bidez nahiz oszilazio-estrategiaren bidez fabrikatutako hormak II-3. taulan jasotzen den bezala izendatzen dira.

II-3. taula. Hainbat strategiaren bidez fabrikatutako hormak definitzeko erabilitako nomenklaturaren laburpena

Horma mota	Definizioa	Irudikapena
Horma sinplea	Kordoi bakarra geruza bakoitzean	_____
Horma gainjarri bikoitza	Bi kordoi gainjarri geruza bakoitzean	=====
Horma gainjarri hirukoitza	Hiru kordoi gainjarri geruza bakoitzean	=====
Horma oszilatu sinplea	Kordoi oszilatu bakarra geruza bakoitzean	^v^v^v

Azkenik, matrize-estrategian, pieza bakarra egin ordez, aldi berean hainbat pieza fabrikatzen dira, hau da, lehen piezaren geruza bat ezarri ostean, hurrengo piezaren geruza bera ezarriko da eta horrela hurrenez hurren.

Adibidez, Ma et al.-ek [Ma, 2019] ikerketa sakona burutu zuten aluminioaleazioetan metalezko egitura handiak eta horma meheak fabrikatzeko oszilazio-

estrategia erabiltzeari buruz. Ikerketa honen helburu nagusia goiko gainazalaren lautasuna hobetzeko estrategia oszilatzailea erabiltzea eraginkorra zela ondorioztatzea zen. Bestalde, Caballero et al.-ek [Caballero, 2019] ezarritako altzairu herdoilgaitzaren (17-4 PH) mikroegituran eta propietate mekanikoetan, WAAM prozesuaren hainbat aldagaik, hala nola, gas babesle motak, ezarpen-estrategiak (kordoi sinplea, oszilazioa eta kordoi gainjarriak) eta ondorengo tratamendu termikoek zuten eragina zehazteko ikerketa bat egin zuten. Bestalde, Xu et al.-ek [Xu, 2019] altzairu martensitikoetan gainjartze paraleloa, triangul-formako oszilazioa eta karratu-formako oszilazioa alderatu zituzten. Azkenik, Dirisu et al.-ek [Dirisu, 2019] erresistentzia mekanikoaren eta hausturarekiko erresistentziaren balioak alderatu zituzten, oszilazio-estrategiaren eta kordoi bakarraren bidez fabrikatutako altzairuzko osagaietan. Gaur egun arte, ikerketa horiek guztiak ezarpen-tasa txikiko GMAW funtzionamendu-moduetarako egin dira. Beraz, oraindik ez da aztertu oszilazio-estrategiak ezarpen-tasa handiko prozesuetan duen eragina.

4.5 Bero-ekarpena materialaren ezarpen-prozesuan

WAAM teknologiaren azterketaren barruan, merezi duen arreta guztia jaso ez duen beste alderdi bat bero-ekarpena da. WAAM prozesuan, fusio- eta solidotze-ziklo ugariak bero-hedapen ez uniformeak sortzen dute fabrikatutako osagaietan. Bero hedapen eta metaketa ez-lineal honek lortutako osagaien morfologia, mikroegitura eta propietate mekanikoak zehazten dituzte [Wu, 2018-b]. Adibidez, Li et al.-ek [Li, 2020-a] bero-ekarpenak, Al-7Si-0,6Mg aluminio-aleazioan fabrikatutako osagaien mikroegituran eta propietate mekanikoetan, eragina duela frogatu zuten. Era berean, hariaren elikatze-abiadura eta aitzinamendu-abiadura aldatuta emaitza berberak lortu zituzten, Al-Mg aleaziozko WAAM bidez fabrikatutako probetetan, Su et al.-ek [Su, 2019]. Ti6Al4V aleazioan, Wu et al.-ek [Wu, 2018-a] beroaren metaketak lortutako piezen forma geometrikoari eragiten diola adierazi zuten. Gainera, frogatuta dago bero-ekarpenak barne-akatsen eraketei, hondar-tentsioei, distortsioari eta fase-erlaketari ere eragiten diela [Oliveira, 2020]. Beraz, argi dago WAAM prozesuan tenperatura monitorizatzeko eta kontrolatzeko sistemak beharrezkoak direla.

Ondorioz, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuan sartutako bero-kantitatea handia denez, beharrezkoa da hozte-denborak txertatzea geruzen artean, osagaia hozteko, kolapsoa saihesteko eta bero-metaketa ondoak minimizatzeko. Hozte-denbora horiek denbora-tarte finko gisa defini daitezke edo hurrengo geruza ezarri aurretik tenperatura finko bat lortu arteko denbora gisa [Montevecchi, 2018]. Horrela, geruzen arteko tenperatura bero-ekarpenarekin estuki lotuta dagoen parametro bat da. Derekar et al.-ek [Derekar, 2019]

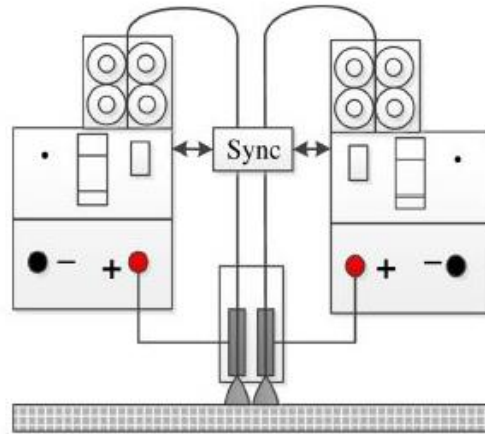
aluminiozko osagaietan geruzen arteko tenperaturak porositatean eta lortutako propietate mekanikoetan duen eragina aztertu zuten. Gainera, azterlan honetan, ezarpen-estrategia oszilatzailea erabili zuten.

4.6 GMAW prozesuan oinarritutako WAAM teknologia hobetuak

Aipatu bezala, WAAM teknologia ekonomikoki lehiakorra izan dadin, beharrezkoa da ezarpen-tasa ahalik eta altuenak izatea. GMAW prozesu tradizionalarekin ezarpen-tasa handiak lortzeko, beharrezkoa da hariaren elikatze-abiadura altuak izatea eta beraz, bero-ekarpena handitzea. Horrek ezegonkortasuna sor dezake prozesuan eta horregatik, ezarpen-tasa gehieneko balio gaindiezin batera mugatuta dago. Azken aldian, ordea, prozesuan aldaketak planteatzen dituzten ikerketak burutzen dira, balio hori maximizatu ahal izateko. Ildo honetan, hiru metodo nagusi garatu dira: bi GMAW elektrodo tandemean kokatuak, GMAW/GTAW hibridoa (GMAW prozesuari GTAW elektrodo bat gehitzea) eta GMAW prozesu tradizionalari beste hari bat (*Hot wire*, *HW*) gehitzea.

4.6.1 Bi GMAW elektrodo tandemean kokatuak

Prozesu honetan bi GMAW elektrodo tandemean kokatzen dira zuzi beraren barruan, elkarrengandik isolatuta eta energia-iturri ezberdinetatik elikatuta, aldi berean arku elektrikoa sortuz eta oinarri-materialari energia emanez. Hala, hari bakarreko GMAW prozesu konbentzionalarekin lortzen den bero-banaketa aldatu egiten da, II-10. irudian ikus daitekeen bezala [Fang, 2012]. Horrelako prozesuetan, bi arku elektriko izan arren, bainu urtu bakarra sortzen da. Bainu urtu hori, GMAW elektrodo bakarrarekin lortutako bainuarekin alderatuta askoz handiagoa da, bero-ekarpen berarekin [Chen, 2015]. Horri esker, tandem prozesua oso prozesu eraginkorra da, ezarpen-tasa altuak, produktibitatean hobekuntzak eta akatsen murrizketa lortzen baititu, lortutako soldadura-kordoen kalitatea handituz [Yao, 2016]. Adibidez, Lee et al.-ek [Lee, 2013] aluminioan, tandem prozesuaren ezarpen-tasa (8,7 kg/h) hari bakarreko prozesuarekin alderatu zuten (5,52 kg/h) eta hariaren diametro bererako (1,6 mm), nabarmen handitu zitekeela ondorioztatu zuten. Bestalde, Martina et al.-ek [Martina, 2018] altzairu herdoilgaitzean (17-4 PH), tandem teknologiadun zuzi batekin MIG pulsatu teknika erabiliz, 9,5 kg/h-ko ezarpen-tasak lortu zituzten.

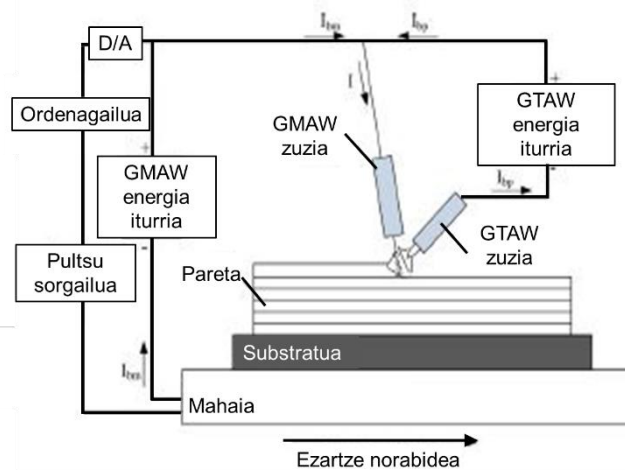


II-10. irudia. Bi GMAW elektrododun tandem prozesua [Yao, 2016]

4.6.2 GMAW/GTAW prozesu hibridoa

Helburu bererako, ohiko GMAW zuziari beste GTAW elektrodo bat gehitu dakioke, teknologia hibrido bat sortuz. Teknologia honekin ezarpen-tasa handiagoak lortzen dira, GTAW zuziak oinarri-materiala aurreberotu eta bertan bainu urtua sortzen baitu, ondoren bertatik GMAW zuzia pasatzeko eta nahi den material kopurua arku egonkorrago batekin ezartzeko [Sahasrabudhe, 2018-b]. Prozesu mota honetan, materialaren transferentzia modua, produktibitatea eta prozesuaren kalitatea definitzeko bi zuzien arteko elkarrekintzak garrantzitsuak dira [Sahasrabudhe, 2018-a].

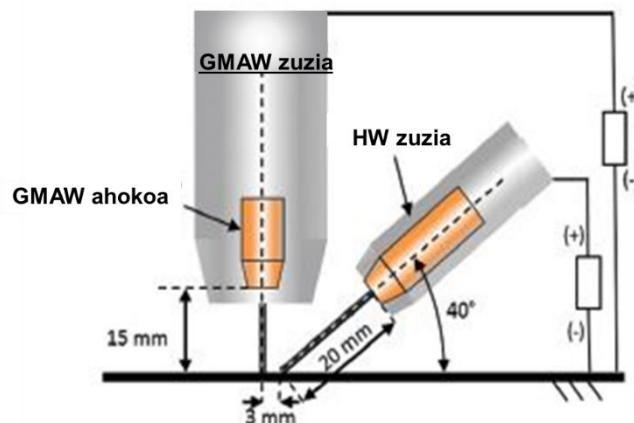
Idea horren barruan bi teknologia bereizten dira. Lehenengoa, oinarri-materialean sartzen den bero-ekarpena murrizten duen eta intentsitatea konstante mantentzen duen elektrodo-bikoitzaren teknologia da, *bypass*ean GTAW zuzi bat sartuz (II-11. irudia). Adibidez, elektrodo bikoitzeko teknologiaren bidez horma finak fabrikatzeko orduan, materialaren erabilera-koefizientea %10 baino gehiago handitzen da eta beraz, materialaren ezarpen-efizientzia eta ezarpen-tasa handitu egiten dira teknika tradizionalekin alderatuta [Yang, 2016]. Bigarrena, aldiz, GMAW/GTAW hibrida izenekoa da, non GTAW zuzi berri bat gehitzen den bere energia-iturriarekin arku elektrikoaren banaketa optimoa lortzeko [Chen, 2017].



II-11. irudia. GMAW/GTAW prozesu hibridoan, GTAW zuzia bypass-an sartuta ([Yang, 2016] lanetik egokitua)

4.6.3 GMAW-HW prozesua

Azkenik, planteatutako beste irtenbide bat GMAW prozesu tradizionalari hari bero gehigarri bat gehitzea da (GMAW-HW). Hari beroa prozesuan sartu aurretik berotzen da, bertatik korrante elektriko bat sartzeari esker (II-12. irudia). Korrante hori, hari nagusian sartzen dena baino askoz txikiagoa da eta ez da nahikoa oinarri-materialaren eta hari beroaren artean arku elektriko bat sortzeko.



II-12. irudia. GMAW-HW prozesuaren errepresentazio grafikoa ([Günther, 2018-a] lanetik egokitua)

Jada aipatu den bezala, GMAW prozesu tradizionalean, ezarpen-tasa (denbora-unitate bakoitzeko elikatzen den material kopurua) handitzean bero-ekarpena handitzen da eta horrek gehiegizko beroa sortzen du fabrikatu beharreko piezan. Horregatik, materialak jasan dezakeen beroa mugagabea ez denez, elikatzen den material kopuruaren balioa ezin da mugarik gabe handitu. Hala, oso baliagarria izango litzateke energiaren eta materialaren ekarpenak bereiztea, bakoitza bere aldetik aldatu ahal izateko.

Hori da, hain zuzen ere, HW hari beroa gehituta lortzen dena. GMAW elektrodo nagusiak sortutako beroaren zati bat HWk sartutako materiala urtzeko erabiltzen da. Horrela, energia berarekin material gehiago urtzen da, ezarpen-tasa handituz eta diluzioa murriztuz. Gainera, GMAW prozesuaren aldaera honen bidez lortutako ezarpen-tasak altuagoak direnez, produktibitatea handitu egiten da.

Gaur egun arte, prozesu hori estaldurak fabrikatzeko baino ez da erabili. Adibidez, Günther et al.-ek [Günther, 2018-a] gainazalak gogortzeko nikelan oinarritutako estaldura bat ezarri zuten, GMAW-HW teknologia erabiliz. Teknologia honen bidez, beroa atera zuten bainu urtutik, diluzioa %5 gutxituz eta 12 kg/h-ko ezarpen-tasa handiagoak lortuz. Aldiz, Günther et al.-ek [Günther, 2018-b] beste ikerketa batean, FeCrCn oinarritutako beste gainazalak gogortzeko estaldura bat ezarri zuten, 9 kg/h-ko ezarpen-tasak eta %10eko diluzioak lortuz. GMAW prozesu tradizionalarekin, berriz, estaldura bera egiteko lortutako ezarpen-tasak 4,5 kg/h-koak ziren, %50eko diluzioekin. Gainera, hariaren elikatze-abiadura bererako, ohiko GMAW prozesuarekin alderatuta, beharrezko potentzia %30 murrizten da HWa erabiltzean. Izan ere, hari nagusiaren arku elektrikoak eta bainu urtuak hari beroa aurrez berotzen dute eta hori nahikoa da bainu urtuarekin kontaktuan sartzean urtzeko.

5 Altzairuak eta aluminio-aleazioak

WAAM prozesuak pieza metalikoak soldagarritzat jotzen diren materialetan fabrikatzea ahalbidetzen du. Normalean, kostu txikia, kalitate handia eta propietate ziurtatuak dituzten metalezko hariak erabiltzen dira ezarpen prozesuetarako. Erabilitako harien diametroa normalean 0,8 mm-tik 4 mm-ra doa [Sames, 2016]. Beraz, WAAM teknologiak erabiltzen dituen hariak material anitzetan daude eskuragarri eta hala, hainbat materialetan fabrikatu daitezke piezak: altzairuetan [Jin, 2020], aluminio-aleazioetan [Derekar, 2018], nikel-aleazioetan [Artaza, 2020-a], titanio-aleazioetan [Artaza, 2020-b], kobre-aleazioetan [Qi, 2018], etab.

Oraindik, hainbat materialetan, WAAM prozesuaren bidez lortutako mikroegitura eta propietate mekanikoak ikertzen ari dira. Prozesuan zehar, materialak berotze- eta hozte-ziklo termikoak jasaten ditu eta ziklo horiek mikroegitura espezifikoak sor ditzakete. Mikroegitura horiek materialak izango dituen propietate mekanikoak zehaztuko dituzte eta beraz, horien kontrolak berebiziko garrantzia izango du [Li, 2019].

5.1 Altzairuak

Altzairuak burdinazko aleazioak dira, ingeniartzako material gisa asko erabiltzen direnak. Konposizioaren arabera, altzairu mota desberdinak lor daitezke beren propietateekin. Oro har, trakzioarekiko erresistentzia handia, fabrikazio erraza eta kostu txikia duten materialak dira. Altzairuak, WAAM fabrikazio-teknologiekin konbinatuta, pieza handiak fabrikatzeko erabil daitezke kostu global txikiarekin, adibidez, ontzigtzaren sektorean [Queguineur, 2018], gas & oil sektorean [Hejripour, 2019], energia eolikoaren sektorean [Dirisu, 2019], eraikuntzan eta automobil industrian [Rodrigues, 2019-b]. Hainbat ikerketetan, WAAM teknologiaren bidez hainbat altzairu ezberdinetan fabrikatu dira piezak: altzairu gozoetan [Dirisu, 2019], altzairu herdoilgaitzetan [Caballero, 2019] eta erreminta-altzairuetan [Xu, 2019]. Doktore-tesi honetan, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez, altzairu gozoetan piezen fabrikazioa aztertuko da.

Aipatu bezala, WAAM teknologian ezarpena geruzaz geruza egiten da eta horrek ziklo termiko jarraitu eta aldakorrek sortzen ditu. Ondorioz, altzairu gozoetan, karbono-eduki txikia dutenez eta aleazio-elementuen proportzioaren arabera, mikroegituran heterogeneotasunak sortzen dira eta propietate mekanikoetan dispersioak. Berotze-malda, gailur-tenperatura eta hozte-ratio ezberdinak dituzten ziklo termiko errepikakorrek mikroegitura konposatua sortzen dute. Mikroegitura hori likidotik solidorako eta solidotik likidorako transformazioen emaitza da, bai eta beroan gertatzen diren egoera solidoko transformazioena (ferritatik austenitara edo austenitatik ferritara) eta hoztearena (austenitatik ale-mugako ferritara, Widmanstätten ferritara, ferrita azikularra, baintara edo martensitara) ere. Horrela, hozte-prozesu motaren arabera, mikroegitura ezberdinak aurki daitezke, hala nola, ferrita azikularra, bainta, perlita, etab. Adibidez, Mn eta Ni aleazio-elementuek tenplagarritasuna handitzen dute ferrita azikularra sortzen laguntzen dutelako; Mo eta Cr elementuek, berriz, baintaren eraketa handitzen dute [Dirisu, 2019].

Choi eta Hillek C-Mn altzairuzko (altzairu gozozko) soldadura-kordoen hozte prozesuko fase nagusien transformazio-tenperaturak azaldu zituzten [Choi, 1978]:

1. Hoztea moderatua denean, lehen mailako ferrita 800 °C eta 650 °C artean nukleatua, austenitaren ale-mugetan sortzen da.
2. Ferritazko albo-plakak (askotan, Widmanstätten ferrita deitua) 750 °C eta 650 °C artean eratzen dira austenitaren ale-mugetan, hozte-abiadurak handitzen direnean.
3. Ale fineko ferrita azikularra gutxi gorabehera 650 °C-tik behera eratzen da austenita aleen barruan.

4. Dislokazioz osatutako subegitura bat duen listoiz osatutako egitura bat eratzen da 500 °C-tik behera. Egitura hori bainitikoa da hozte-abiadurak azkarrak direnean (> 50 °C/s).
5. Aleazio handiko altzairuetan, 400 °C-tik behera hozte azkarretan, mikroegitura martensitikoa sortzen da.

Hala, berriz ere, materiala Ac1 tenperaturatik (tenperatura eutektoidetik) gora berotzen bada, transformazio produktu horiek austenita bihurtzen dira berriro. Eraldaketa zikliko horiek eremu hauskorragoz eta ez hain hauskorrez osatutako mikroegitura bat osatzen dute, erresistentzia mekanikoaren eta inpaktu-erresistentziaren balioetan dispersioa sortuz [Shassere, 2019].

Lortutako propietate mekanikoei dagokienez, altzairu gozoak oso eskakizun handiak ez dituzten aplikazio orokorretarako erabiltzen dira. Dirisu et al.-ek [Dirisu, 2019] oszilazio-estrategiarekin eta kordoi bakarreko estrategiarekin, WAAM bidez, fabrikatutako osagaien hausturarekiko erresistentzia eta erresistentzia mekanikoa alderatu zituzten altzairu gozoetan. Aldiz, Shassere et al.-ek [Shassere, 2019] WAAM teknologiaren bidez bi horma fabrikatu zituzten 572 x 470 mm eta 305 x 362 mm-ko neurrikoak, trakzio-saiakuntzaren eta erresilientzia saiakuntzaren bidez ER70S-6 altzairua karakterizatzeko. Azkenik, Haden et al.-ek [Haden, 2017] ER70S-6 altzairu gozoz eta 304 altzairu herdoilgaitzez, WAAM bidez, egindako horma meheak entseiatu zituzten. II-3. taulan egile bakoitzak lortutako propietate mekanikoak laburbiltzen dira:

II-4. taula. ER70S-6 altzairu gozoan, autore ezberdinek ezarpen-estrategia ezberdinen bidez, WAAM teknologiarekin, fabrikatutako piezen propietate mekanikoen alderaketa

Estrategia	Limite elastikoa (MPa)	Haustura-tentsioa (MPa)	Elongazioa (%)	Egilea
Bi kordoi gainezarri	360 ± 7	475 ± 4	34-42	[Shassere, 2019]
Kordoi bakarra	370	480	35,5	[Dirisu, 2019]
Oszilazioa	420	510	33	
Kordoi bakarra	350	460	-	[Haden, 2017]

Azken urteotan, altzairu gozoetan materiala karakterizatzeari eta piezak WAAM teknologiaren bidez fabrikatzeari buruzko hainbat lan burutu dira. Adibidez, Venturini et al.-ek [Venturini, 2016] ER70S-6 altzairuzko T formako gurutzeen fabrikazioa aztertu zuten. Bestalde, Somashekara eta Suryakumarrek [Somashekara, 2017] GMAW tandem elektrodo bikoitzeko teknologiaren bidez material anitzeko soldadura-kordoiak ezarri zituzten. Bi elektrodoak, 1,2 mm-ko diametrokoak, ER70S-6 eta ER110S-G altzairu gozozko hariekin elikatu ziren, funtzionalki hobetutako piezak fabrikatu ahal izateko. Gainera, II-13. irudian ikus

daitekeen bezala, WAAM ekipamenduen fabrikatzaile nagusiek eta teknologiaren garatzaileek altzairuetan hainbat pieza esanguratsu fabrikatu dituzte hainbat aplikaziotarako.



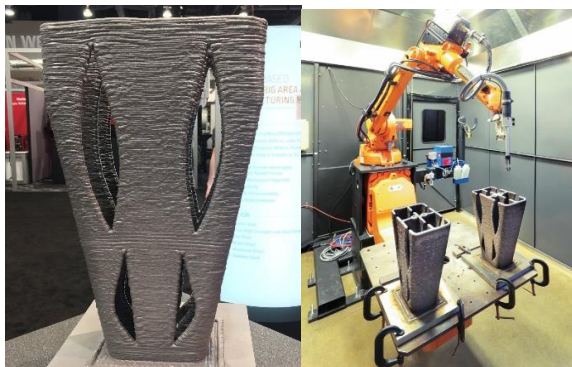
(b)



(a)



(c)



(d)



(e)

II-13. irudia. (a) MX3D enpresak altzairu herdoilgaitzean fabrikatutako zubia [MX3D, 2021], (b) Barne kanalekin altzairuan fabrikatutako pieza [Lincoln Electric Additive, 2021], (c) Norabide anitzeko 10 tutu elkartzen dituen konektorea YHJ507M harian fabrikatua [Yili, 2018], (d) Altzairuan barne kanalekin fabrikatutako pieza [Lincoln Electric Additive, 2021], (e) Altzairuan fabrikatutako hondeatzaile baten besoa osatzen duen pieza [Greer, 2019]

5.2 Aluminio-aleazioak

Aluminioak gaitasun berezia du aleazioak sortzeko hainbat elementurekin (metalikoak zein ez-metalikoak), erresistentzia espezifikoko handiko eta korrosioarekiko erresistentzia handiko material arinak sortuz. Aluminio-aleazioak, ziurrenik, pieza handiak fabrikatzeko aukera interesgarrienetako bat eta ekonomikoki lehiakorrenetako bat dira. Industria-aplikazio nagusiak hainbat

sektoretan ikus daitezke, hala nola, automobilgintzan [Klein, 2020], ontzigintza-sektorean [Taşdemir, 2020] eta sektore aeroespazialean [Starke, 2010]. Hala ere, aluminio-aleazioen soldadura problematikoak izan daiteke, erabilitako aleazioaren konposizioaren arabera, porositatea, gainazalean oxido-filmak eta solidotze-prozesuan pitzadurak agertu baitaitezke [Derekar, 2018]. Al-Cu (2xxx) [Fang, 2021], Al-Si (4xxx) [Ma, 2019] eta Al-Mg (5xxx) [Horgar, 2018] aluminiozko serieak egokiak dira WAAM teknologiaren bidez fabrikatzeko. Bestalde, 7xxx eta 6xxx serieak ez dira hain egokiak, akats metalurgikoak sortzen baitira baina urtu zurrunbilotsuen ondorioz [Wu, 2018-b].

Merkatuan eskuragarri dauden WAAM teknologien artean, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua etorkizun handikoa da akatsik gabeko aluminiozko pieza handiak lortzeko [Williams, 2016-b]. Zehazki, aluminio-aleazioen soldadura-ahalmen mugatuak, aluminioentzako funtzionamendu-modu espezifikoak dituzten GMAW soldadura-iturrien beharra sortzen du. Bestalde, gainontzeko soldadura-teknologiek, esaterako, PAWk eta GTAWk, arazoak izaten dituzte. Zehazki, GMAW teknologiaren barruan AC pultsatua funtzionamendu-modua bereziki egokia da horrelako soldaduretarako.

Ondorioz, porositatea da WAAM bidez aluminio-aleazioetan piezak fabrikatzeko erronka nagusia. Porositate horren jatorria, hidrogenoak egoera solidoan eta likidoan duen disolbagarritasun ezberdinetan dago. Ezarpen-prozesuan zehar solidotutako aluminioaren barruan hidrogeno askearen kantitateak maila jakin batzuk gainditzen dituenean porositatea agertzen da eta piezen propietate mekanikoei eragin diezaieke [Gu, 2019]. Ikerketa batzuetan, porositate mailak murrizteko, alea fintzeko eta propietate mekanikoak hobetzeko gailu gehigarriak behar dituzten teknika mekanikoak, hala nola, geruzen arteko ijezketa [Gu, 2018] [Gu, 2020] eta geruzen arteko mailukadak [Fang, 2021] erabili izan dira. Beste ikerketa batzuetan, aldiz, helburu bererako tratamendu termikoak erabili dira [Gu, 2016].

WAAM bidez ezarritako eta doktore-tesi honetan erabilitako 5356 aluminio-aleazioaren propietate mekanikoei dagokienez, Li et al.-ek [S. Li, 2020] aleazio horren mikroegitura eta propietate mekanikoak alderatu zituzten bi babes-gas mota erabilia: argona eta purutasun handiko nitrogenoa. II-4. taulan ikus daitezke, azterketa horretan, kordoi bakarreko hormetan lortutako propietate mekanikoak.

II-5. taula. Babes-gas gisa purutasun altuko nitrogenoa eta argona erabilia WAAM teknologia bidez fabrikatutako 5356 aluminio-aleazioaren propietate mekanikoak.

Babes-gasa	Limite elastikoa (MPa)	Hautura-tentsioa (MPa)	Elongazioa (%)
Ar	130 ± 3	275 ± 2	28 ± 5
N ₂	150 ± 2	200 ± 4	4 ± 1

Egin diren azken ikerketetan nabarmen aurreratu da aluminiozko piezak fabrikatzeko WAAM teknologiaren erabileran. Adibidez, MX3D enpresak [MX3D, 2021] topologikoki optimizatutako beso robotiko baten pieza bat fabrikatu zuen (II-14. irudian), erabilitako material kopurua nabarmen murriztuz. Ramlab enpresak [RAMLAB, 2021], bestalde, itsasontzi baten helizea fabrikatu zuen nikel-aluminio-brontzezko aleazio batean Damen Shipyard [Damen, 2021] taldeak errektifikatua eta dagoeneko martxan dagoena. Helize hori eta beste zenbait aplikazio adibide II-14. irudian ikus daitezke.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

II-14. irudia. (a) Aluminioan fabrikatutako eta topologikoki optimiazatutako beso robotiko baten pieza [MX3D, 2021], (b) Aluminioan ezarpen-estrategien optimizazioarako RASM systems enpresak fabrikatutako pieza [Ma, 2019], (c) 10 m luze den WAAM bidez fabrikatutako aluminiozko pieza [WAAMMAT, 2021], (d) 2,5 m luze den aluminiozko nerbioa WAAM bidez fabrikatua 500kg-tik gorako materialaren aurrezkiak lortuaz [Martina, 2015-a], (e) Nikel-aluminio-brontze aleazioan WAAM bidez fabrikatutako itsasontziko helizea [RAMLAB, 2021]

6 WAAM teknologiadun makina komertzialak

GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua duten makinei dagokienez, nagusiki bi motatako soluzioak daude: makina-erremintan oinarritutako sistemak eta sistema robotikoak [Urhal, 2019]. Hain zuzen ere, WAAM sistema gehienek robot industrial antropomorfitiko bat erabiltzen dute mugimendu mekanismo bezala eta ohikoena gas babeslea prozesuan sartzeko babes-sistema lokal bat erabiltzea da [Wu, 2018-b]. Merkatuan badira soluzio komertzial batzuk, kontrol-eta monitorizazio-sistema integratuak eta CAD/CAM software espezifikoak dituztenak. Hala ere, ia edozein manipulatzailerik eta soldadura-iturri bat konbinatu daitezke WAAM sistema sinple bat sortzeko. Horregatik, WAAM prozesurako behar den ekipamendua merkea dela esaten da, elektroi sortak edo prezio altuko laserrak erabiltzen dituzten sistemekin alderatuta. Gainera, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuak ez du kamera inerte behar material arruntekin (altzairua, aluminioa, etab.) lan egiteko, ekipamenduaren prezioa are gehiago murriztuz. Teknologia horrekin piezak fabrikatzeko, hiru makina mota bereiz daitezke: 3 ardatzeko makinak, 5 ardatzeko makinak edo robot antropomorfitikoak. Jarraian, unibertsitateetan, ikerketa-zentroetan eta enpresetan garatzen ari diren makinak edo roboten garapenak aurkezten dira:

6.1 ADDILAN

ADDILAN enpresak [ADDILAN, 2021] 3+2-ardatzeko makina bat merkaturatzen du (II-15. irudia) mahai kulunkari batekin. Makina horrek GMAW teknologian, PAW teknologian eta GTAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuak biltzen ditu. Makina hori gauza ezberdin askotarako erabili daiteke bere arkitektura bereziagatik eta CNC software irekiagatik. Makina honek, piezak material errektiboetan, titanioa kasu, fabrikatzea ahalbidetzen duen kamera inerte eta itxi bat ere badu. Piezak fabrikatzeko eraikuntza ingurunea 1300 x 900 x 500 mm-koa da eta gehieneko pisua 300 kg-koa.



II-15. irudia. ADDILAN v.0.1 makina [ADDILAN, 2021]

6.2 GEFERTEC

GEFERTEC enpresa alemaniarra [GEFERTEC, 2021], 3DMP® (WAAM teknologia) fabrikazio-teknologia txertatuz, bere GTArc AM machine (II-16. irudia) makina seriea aurkeztu zuen. Serie horren barruan, 3 ardatzeko makinek gehienez 3 m³-ko piezak eta 3.000 kg-koak egin ditzakete eta 5 ardatzeko makinek, berriz, 0,8 m³-tik gorako piezak egin ditzakete gehienez 500 kg-ko pisuarekin.



II-16. irudia. WAAM GTArc603 makina [GEFERTEC, 2021]

6.3 AML3D

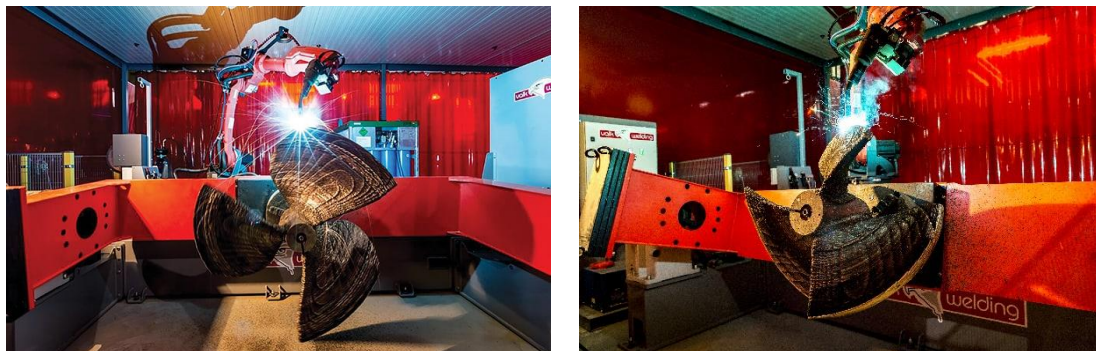
AML3D konpainiak [AML3D, 2021] ARCEMY izeneko GMAW prozesuan oinarritutako bere WAAM makina merkaturatu du (II-17. irudia). Makina honek osagai metalikoak fabrikatzeko berariaz diseinatutako errailetan muntatzen diren robot bat edo bi integratzen ditu. Gainera, haria eta gas babeslea biltegitratzeko sistemak ere baditu. Azkenik, fabrikazio-espazioa luzatu daiteke bezeroaren beharren arabera.



II-17. irudia. ARCEMY makina GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez piezak fabrikatzeko [AML3D, 2021]

6.4 RAMLAB

RAMLAB Herbehereetako enpresa taldeak [RAMLAB, 2021] 6 ardatzeko robot batean eta bi beso mugikorretan oinarritutako WAAM sistema bat garatu du 2 x 2 x 2 m arteko piezak fabrikatzeko (II-18. irudia). Metalezko inprimagailu handian, bi besoek pieza manipulatzeko dute, robot antropomorfitikoak WAAM teknologia bidez materiala ezartzen duen bitartean. Konfigurazio eta eragiketa modu hori bakarra da munduan. Gainera, enpresa horrek MaxQ monitorizazio- eta kontrol-sistema ere merkaturatzen du.



II-18. irudia. RAMLAB makina Damen Shipyard taldearentzat itsasontzi baten helizearen fabrikazio-prozesuan [RAMLAB, 2021]

6.5 Lincoln Electric

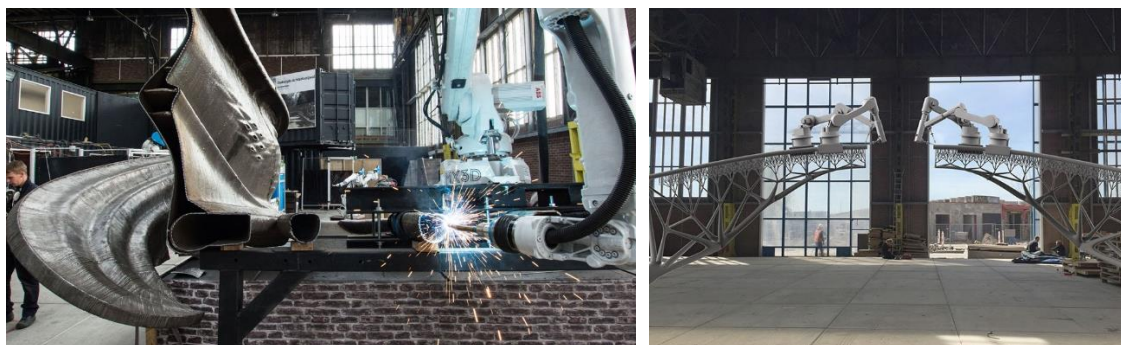
Lincoln Electric [Lincoln Electric Additive, 2021] konpainia, Wolf Robotics eta Lincoln Electric Additive Solutions enpresen bidez, WAAM teknologiaz ekipatutako robot antropomorfikoetan oinarritutako soluzio industrialak merkaturatzen ari da (II-19. irudia). Zehazki, robot antropomorfiko bat eta mahai mugikor bat dituen sistema bat garatu dute.



II-19. irudia. Lincoln Electric enpresaren sistema robot antropomorfiko batean oinarritua [Lincoln Electric Additive, 2021]

6.6 MX3D

MX3D enpresak [MX3D, 2021] hainbat urte daramatza ingeniartzaren eta eraikuntzaren sektoreko enpresa garrantzitsuekin lankidetzan, WAAM teknologiadun soluzio robotikoak garatzeko (II-20. irudia). Horrez gain, Metal XL softwarea merkaturatzen du eta WAAM bidez piezak fabrikatzen ditu enkarguz.



II-20. irudia. Eraikuntzaren sektorean MX3D enpresaren aplikazioen adibideak [MX3D, 2021]

6.7 Cranfield unibertsitatea

Cranfieldeko Unibertsitatea WAAM teknologian munduko erreferente nagusienetakoa da. WAAMMat programaren barnean [WAAMMAT, 2021], WAAM teknologiari buruzko ikerketa eta garapen proiektu ugari egin dituzte,

hainbat materialetan lan eginez (aluminioa, altzairuak, titanioa, Inconel-a, etab.), ikuskapen, monitorizazio eta postprozesu aurreratuetan bidea irekiz. Makinen ikuspegitik, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuan zentratutako proiektu gehienak robot antropomorfikoekin burutu dituzte, II-21. irudian ikusten den bezala. Irudian agertzen den proiektuan, konkretuki, zelula robotiko bat garatu zuten bi errailen gainean muntatutako bi robot sinkronizaturekin, tamaina handiko pieza metalikoak fabrikatzeko.



II-21. irudia. WAAM zelula robotikoa, GMAW prozesuan oinarritua, paraleloan lan egiten duten 2 robotekin produktibitatea handitzeko [WAAMMAT, 2021]

7 WAAM prozesuaren monitorizazioa eta kontrola

DED teknologietan egindako azken ikerketetan, teknologia hauetarako erabilitako makina eta sistemetan prozesua monitorizatzeko eta kontrolatzeko sistemak txertatu dira eta materialaren ezarpen-prozesuan zehar kontrola ahalbidetuko duten kontrol-algoritmoak garatu dira. Hau da, ezarpen fidagarri eta eraginkor bat lortzeko, prozesuaren barruan begizta itxiko kontrol-sistemak sartu dira, erregistratutako datuen arabera parametro nagusien gainean jardun eta automatikoki egokitzeko.

Hori funtsezkoa da piezen kalitatea ziurtatzeko eta akatsak saihesteko. GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez fabrikatutako piezetan aurkitzen diren akats nagusiak honakoak dira: poroak (batez ere aluminioan), urtu gabeko eremuak, deformazioak (hondar-tentsioak limite elastikoaren eta haustura-tentsioaren artean daudenean gertatzen dira), arrakalak (hondar-tentsioak haustura-tentsioaren gainetik daudenean gertatzen dira) [Horgar, 2018], delaminazioa [Vimal, 2020], zipriztinak eta WAAM prozesuari inerenteak diren eta materialak nekearen aurrean izango dituen propietateak zehazten dituzten berotze- eta hozte-ziklo errepikakorrek eragindako hondar-tentsioak.

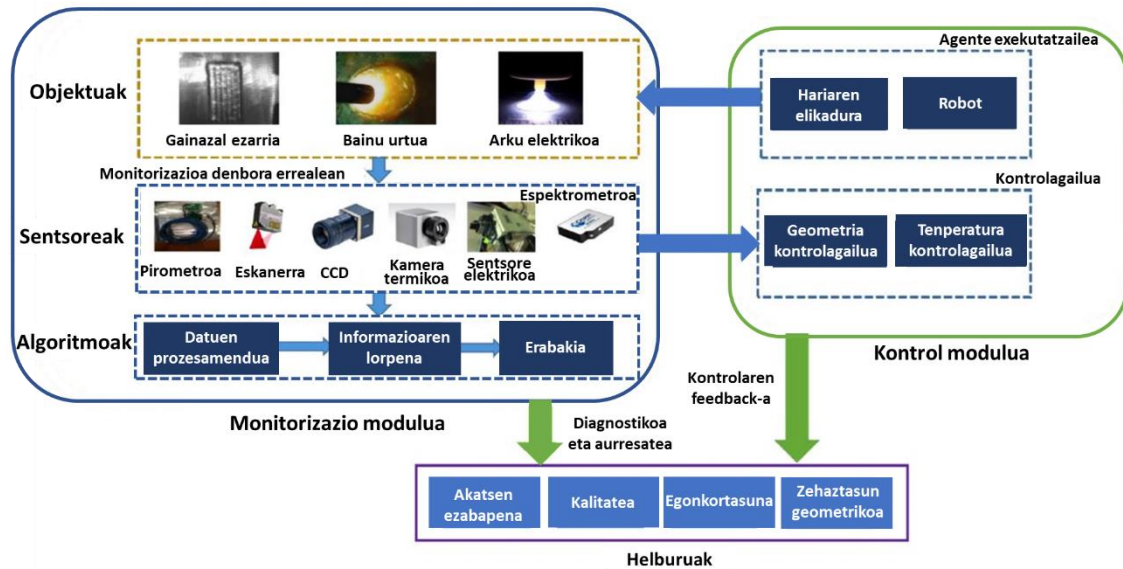
Hondar-tentsio hauek piezan distortsioa sor dezakete eta tolerantziak ere murriztu ditzakete [Rodrigues, 2019-b],

Prozesu-parametro egokiak aukeratuta eta prozesua une oro monitorizatuta eta kontrolatuta, errore horiek murriztu daitezke. Gainera, hondar-tentsioa kontrolatzeko, ondorengo tratamendu termikoak [Birmingham, 2018], ezarpen-estrategien egokitzapena [Mughal, 2005], in situ berotzeko/hozteko mekanismoak [Lu, 2018] [Denlinger, 2015] eta hotzean deformatzeko teknikak [McAndrew, 2018] ere erabili dira hainbat ikerketatan.

Horregatik guztiagatik, funtsezkoa da monitorizazio- eta ikuskapen-sistemak izatea WAAM prozesua kontrolatzeko [Everton, 2016]. Hala, WAAM prozesua oso sentikorra da prozesu-parametroen aldaketekiko. Beraz, parametroak monitorizatzea eta begizta itxian kontrolatzea funtsezkoa da piezak fabrikatzen diren bitartean prozesua zuzentzeko. Horrela, piezaren hondar-tentsioak eta akatsak murriztu daitezke.

Gaur egun, oraindik ere, WAAM prozesuaren monitorizazio- eta kontrol-sistemak garapen faseetan daude, eta horiei buruzko ikerketak kasu sinpleenatarako burutzen dira, hala nola, kordoi bakarreko hormen fabrikaziorako. Gainera, kasu gehienetan, konponbide hauek soldadura prozesuen monitorizazioan oinarritzen dira. Horregatik, merkatuan une honetan ez dago prozesuaren barne-seinaleak eta instalatutako kanpoko sentsoreek jasotako seinaleak eskuratu eta horien arabera erabakiak hartzen dituen algoritmo bat biltzen duen monitorizazio- eta kontrol-sistema integral askorik. Algoritmo horiek WAAM prozesurako berariaz sortutako software batean sar daitezke. Software horrek hasierako diseinutik prozesuaren monitorizazio eta kontrolerako etapa guztiak kontuan hartuko litzuzke eta horrek prozesua erabat automatizatzea ahalbidetuko luke. Gainera, automatizazio hori funtsezkoa izango litzateke WAAM prozesua Industria 4.0 kontzeptuaren barnean sartzeko. Gaur egun, ordea, merkatuan ez dago helburu hauek lortzeko heldutasun nahikorik duen software soluziorik.

II-22. irudian modu eskematikoan laburbiltzen da orain arte egile ezberdinek aztertu dituzten WAAM prozesuaren kontrol- eta monitorizazio-sistemak.



II-22. irudia. WAAM prozesurako monitorizazio- eta kontrol-sistemak ([Xia, 2020] lanetik egokitua)

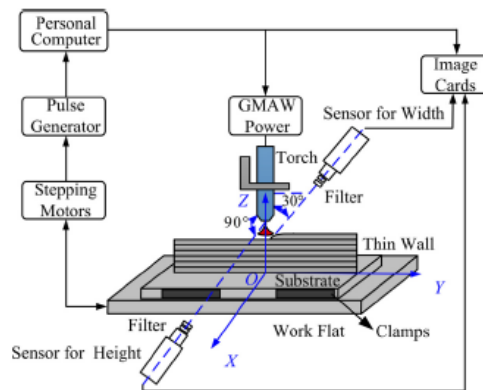
WAAM prozesua monitorizatzeko, alde batetik, ohiko soldadura-prozesuetan bezala, barne-seinaleak eskuratzen dira: intentsitatea, tentsioa, hariaren elikatze-abiadura, sistema mugikorraren aitzinamendu-abiadura, etab. [Artaza, 2017]. Adibidez, Wang et al.-ek [Wang, 2017] soldadura-prozesuetarako, prozesuan zehar monitorizatutako tentsio elektrikoaren seinalearen arabera arkuaren luzera doitzeko egokitzapen-kontrol bat sortu zuten, prozesuaren egonkortasuna areagotuz eta zipriztinak murriztuz.

Bestalde, prozesua kontrolatzeko seinale termikoak, akustikoak, espektralak, elektrikoak eta espektro ikusgarriko irudiak ere monitorizatu daitezke [Xia, 2020]. Oro har, ohikoena eta eraginkorra espektro ikusgarriko irudiak eta seinale termikoak jasotzea da. Hainbat azterlanetan, seinale- eta irudi-mota horiek eskuratzeko, hainbat kanpo-sensore jarri dira.

-Espektro ikusgarriko irudien jasotzea:

Irudiak jasotzea monitorizazio-metodorik zuzenena da eta horien bidez ezarritako materialaren gainazalaren morfologia monitorizatu daiteke. Zentzu honetan, esan beharra dago, ezarritako materialaren forma geometrikoa prozesuaren kontrolerako berebiziko garrantzia duen aspektu bat dela. Horretarako, bi sistema ezberdin daude: prozesuan zeharreko kontrola (*online*) eta prozesutik kanpoko kontrola (*offline*). Prozesuan zeharreko kontrolari (*online*) dagokionez, iragazkidun CCD kamerak erabiltzen dira, prozesuaren argi biziak sortzen duen soldadura eremuaren argitasunaren muturreko aldakuntza gainditzeko. He et al.-ek [He, 2016] CCD kamerei esker, juntura baten betetze prozesuan soldadura bidez ezarritako kordioen forma geometrikoa monitorizatu zuten. Horretarako,

CCD kamera bat ezarri zuten juntaren zeharkako sekzio harrapatzen zuela eta hala, prozesuan zehar ezarritako materialaren geometria determinatu ahal izan zen. WAAM prozesuan teknologia bera sartuz, Xiong et al.-ek [Xiong, 2013] [Xiong, 2016] prozesuan zehar ezarritako kordoi bakoitzaren zabalera eta altuera zehazteko iragazki egokiak dituzten bi CCD kamera erabiliz neurtu zituzten eta jasotako datuen arabera TS egokitu zuten, II-23. irudian ikus daitekeen bezala.



II-23. irudia. WAAM prozesurako CCD kameretan oinarritutako kontrol-sistema baten diagrama eskematikoa [Xiong, 2016]

Bestalde, prozesutik kanpoko kontrolari (*offline*) dagokionean, geruza bakoitza ezarri ondoren eskaner laser baten bidez eskaneatuz gero, ezarritako soldadura-kordoei buruzko hiru dimentsiotako informazioa lor daiteke puntu-hodei moduan. Puntu-hodei horren bidez, momentura arte ezarritako materiala irudikatzen duen hiru dimentsioko irudi bat sor daiteke. Hala, irudi horren bidez ezarpen-estrategia zuzendu daiteke. Ma et al.-ek [Ma, 2019] eskaner laser bat erabili zuten fabrikatzen ari ziren piezaren altuera nahi zena zen eta mekanizazio-etapara igaro zitekeen zehazteko. Azkenik, Hausser et al.-ek [Hausser, 2020] maiztasun handiko kamerak erabili zituzten zuziaren inklinazioek GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuan dituzten efektuak zehazteko. Horretarako, digitalki kalkulatu zituzten izendatutako kamerarekin lortutako bideoetatik bai geruzaren altuera eta bai bainu urtuaren dimentsioak. Datu horien arabera, zuzi-inklinazio jakin batekin ezarritako horma egokia izango den ala ez determina daiteke.

- Seinale termikoak jasotzea:

WAAM bidez fabrikatutako piezen historia termikoak, eragina izan dezake lortutako propietate mekanikoetan eta fabrikatutako piezen zehaztasun geometrikoan. Hala, ziklo termiko horiek auresateko eta aurrez ezagutzeko konplexuak dira. Horregatik, seinale termikoak prozesuan zehar (*online*) jasotzea

oso garrantzitsua da prozesua kontrolatzeko. Jasotze horri dagokionez, orain arte egindako ikerketetan bi ildo nagusi jorratu dira.

Alde batetik, utzitako piezaren tenperatura neurtu da, tenperatura-eremua zehazteko. Aurreko ikerketetan, adibidez, Yang et al.-ek [Yang, 2017] kamera termografiko infragorri bat erabili zuten WAAM bidez egindako hornen tenperatura-eremua neurtzeko eta geruzen arteko hozte-denborak hornen gainazaleko ondulazioan duen eragina zehazteko. Metodo hau hozte-denbora optimoa zehazteko eta kontrolatzeko ere erabil daiteke. Beste ikerketa batean, pirometro baten bidez, prozesuan zehar bainu urtuaren tenperatura monitorizatu zen eta honen bidez geruzen arteko hozte-denborak zehaztu ziren [Artaza, 2017]. Funtzio bererako termopareak ere erabil daitezke.

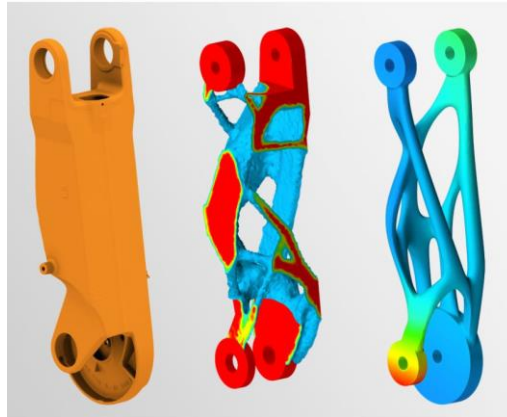
Beste aldetik, bainu urtuaren dinamika monitorizatzen da, egon daitezkeen akatsak detektatzeko eta prozesuaren egonkortasuna neurtzeko. Horretarako, bainu urtuaren neurriak zehazten dira, ondoren kontrolatu ahal izateko. Adibidez, Abe et al.-ek [Abe, 2020] WAAM prozesuan sartutako tentsioa kontrolatu zuten tenperatura erradiazio-termometro baten bidez neurtuz eta bainu urtuaren neurriak simulatuz. Hala, ezarpen-prozesu egonkorragoa lortzen zuten.

8 WAAM teknologiarako CAD diseinua eta ezarpen-ibilbideen diseinua

Fabrikazio-gehirri metalikoa, eta zehazki, WAAM teknologia, diseinu berriak fabrikatzeko gai da, formei, egitura saretuei (*lattice*) eta barne-egiturei dagokienez. Honen adibide dira, Yili et al.-ek [Yili, 2018] fabrikatu zuten 10 hodiko konektorea edo itsasontziko helize bat egiteko Ya eta Hamiltonek [Ya, 2018] proposatu zituzten lau diseinu aukerak. Beraz, WAAM teknologiaren bidez, ia diseinu-askatasun osoa duten geometriak lor daitezke. Horregatik, optimizazio topologikoa bezalako tresnak [Ponche, 2014] fabrikazio-gehirriko teknologien bidez fabrikatuko diren piezen diseinu berriak egiteko edo diseinu zaharrak birdiseinatzeke erabil daitezke. Optimizazio topologikoan piezen diseinu geometriko optimoa zehazten da, beharrezko eskakizunak betez pisua ahalik eta gehien murriztuz eta beraz, erabilitako lehengai kopurua minimizatuz. Horrela, fabrikazio-sistema konbentzionalek ezartzen dituzten diseinu-mugak ez dira bete behar eta eskakizunak kontuan hartuta bakarrik diseina daitezke piezak.

Zehatzago esanda, optimizazio topologikoaren helburu nagusia osagaien egitura arintzea da, haren funtzionaltasun mekanikoak mantenduz. Horri dagokionez, karga mekanikoak topologikoki optimizatutako diseinuak sortzeko sarrerako datuak dira. Hau da, pieza bat topologikoki optimizatzeke, zirriborro-fasean dagoen 3D eredu bat sortzetik hasten da. Eredu horretan, hainbat karga

aplikatzen dira eta piezei aplikatutako tentsioak kalkulatu dira. Maila horretan, piezen geometria birmoldatu egiten da, egiturazko ikuspegitik beharrezkoak diren eremuak mantenduz, eta gainerakoak ezabatuz. Horrela, mekanika- eta diseinubaldintzak betetzen dituen azken geometria lortzen da. Gainera, prozesua amaitzean, baliteke iragarpen-softwareak behar izatea piezaren eskakizun mekanikoak beteko direla ziurtatzeko [Greer, 2019]. Adibidez, II-24. irudian, ondoren, WAAM teknologiaren bidez fabrikatu zen beso robotiko baten optimizazio topologikoa ikus daiteke.



II-24. irudia. Beso robotiko baten birdiseinua optimizazio topologikoaren bidez [MX3D, 2021]

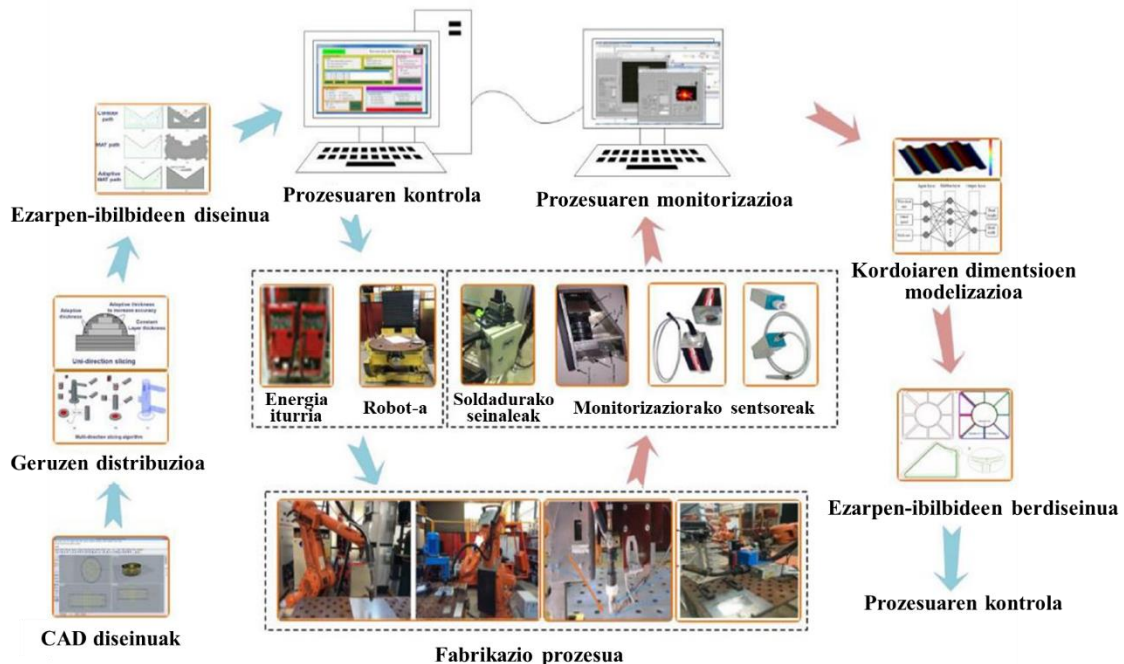
Bestalde, diseinu konbentzional bat WAAM bidez fabrikatzeko, nahiz eta birdiseinu osoa ez egin, piezen diseinuei beti gehitu beharko zaizkie ondoren mekanizatu ahal izateko demasiak.

Teknologia gehigarrien bidez fabrikatzeko diseinua definituta dagoenean, softwareak edo ordenagailuen bidez lagundutako prozesuak planifikatzeko ereduak (*Computer Aided Manufacturing, CAM*) erabiltzen dira ezarpen-sekuentzia eta ibilbideak zehazteko eta beharrezko makina-kodea sortzeko. Siemens NX enpresaren softwareak, esaterako, diseinutik inprimaketarainoko edo inprimaketaren ondorengo balidaziorainoko soluzio bat eskaintzen du sistema integratu bakar batean. Horrela, Siemens NX enpresak fabrikazio-gehigarria industrializatzen du, prototipoak fabrikatzeaz gain produktu iraultzaileak fabrikatu ahal izateko teknologia berritzaileak erabiliz [González, 2017]. Bestalde, gaur egun, Autodesk enpresak ere, bere PowerMill softwarean, atal gehigarri bat sortu du, DED teknologietarako ezarpen-ibilbideak eta makina edo robotetara bidaltzeko kodeak sortzeko. Fabrikatutako piezaren geometriaren eta hautatutako ibilbide motaren arabera (raster, sigi-saga, kiribila, ingurukoa, etab.) piezak barne-akatsik gabe fabrikatuko dira, hala nola, betetze-faltarik edo homogeneotasun ezik gabe [Michel, 2019] [Jafari, 2021].

Ezarpen-ibilbide horiek programatzeko, ezinbestekoa da aukeratutako parametro-multzo bakoitzarekin ezarritako kordoen ezaugarri geometrikoak

jakitea. Horregatik, WAAM teknologiarekin fabrikatutako kordoi sinpleen zabalera eta altuera modelizatzeak berebiziko garrantzia du. Adibidez, ezarpen parametro multzo bakoitzarekin lortutako kordoiaren zabalera funtsezko parametroa da kordoiaren arteko gainjartze distantzia zehazteko. Halaber, kordoiaren altuera funtsezkoa da geruzen hazkundera kontrolatzeko. Beraz, egun arteko literaturan soldadura-kordoiaren geometria iragartzeko ereduak ikerketa-lerro aztertua izan dira [Li, 2020-b] [Dinovitzer, 2019].

II-25. irudian ikusten denez, WAAM prozesua, oro har, fabrikatu beharreko pieza baten 3D diseinutik abiatuko litzateke, diseinu hori WAAM teknologiarako birdiseinatuko litzateke. Ondoren, diseinua geruzatan banatuko litzateke eta geruza bakoitzaren ezarpen-ibilbideak sortuko lirateke CAM software baten bidez, aurrez aurre soldadura-kordoiaren dimentsioak aintzat hartuta. Ibilbideak determinatu ondoren, prozesuaren parametroak zehaztuko lirateke eta pieza robot edo Gantry makina batean fabrikatuko litzateke. Fabrikatu bitartean, prozesuaren barne-parametroak eta makinan instalatutako sentsoreenak monitorizatzen dira. Denbora errealean monitorizatutako datuen bidez, prozesua kontrolatuko da eta lortutako kordoiaren dimentsioak modelizatuko dira, CAM softwarean balio horiek ondo txertatu ez balira ere, ezarpen-ibilbideen birdiseinua burutzeko.



II-25. irudia. WAAM sistema integralaren kontzeptua ([Wu, 2018-b] lanetik egokitua)

III. KAPITULUA

IV. KAPITULUA

V. KAPITULUA

VI. KAPITULUA

VI. KAPITULUA: EKARPENAK ETA LANAREN ETORKIZUNEKO ILDOAK

1 Ekarpinak

Doktore-tesi honetan, lehenik eta behin, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuari buruzko artearen egoeraren berrikuspena burutu da. Jarraian, teknologia horren bidez piezak ezartzeko prozesu honetarako zehazki diseinatutako monitorizazio- eta kontrol-sistemak barnean dituen sistema robotiko automatiko bat garatu da. IV. kapituluan, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren azterketa sakon bat burutu da, ER70S-6 altzairu gozoan oinarrituta eta prozesu-parametroen eta ezarpen-estrategien eragina zehaztu da. Azkenik, V. kapituluan 5356 aluminio-aleazioaren ezarpena aztertu da, funtzionamendu-modu ezberdinen eragina zehaztuz.

Horrela, ikerketa-lan honen ekarpen nagusiak honako puntu hauetan laburbildu daitezke:

- 1- GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez piezak fabrikatzeko sistema robotiko bat garatu da. Sistema honetan, soldadura-zuzi bat, geometria *in-situ* neurtzeko eskaner laser bat eta pirometro bat ezartzen dira robot antropomorfitiko baten eskumuturrean.
- 2- Garatutako sistema robotikoan altuera kontrolaren algoritmoa garatu eta ezarri da. Kontrol horretan, geruza bakoitzaren altuera prozesuan monitorizatutako benetako intentsitatearen arabera doitzen da, intentsitate hori balore optimoen tarte baten barruan mantentzeko.
- 3- GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua egonkorra eta sendoa dela frogatu da, bai altzairuentzat eta baita aluminio-aleazioentzat ere. Emaitez erakusten dutenez, piezen propietate mekanikoak eta integritate metalurgikoa beste prozesu batzuetan, esaterako galdaketan, lortutakoen antzekoak dira.
- 4- GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuko parametro nagusien eta funtzionamendu-modu desberdinen eragina aztertu da. Zehazki, hariaren elikatze-abiaduraren (WFR) eta aitzinamendu-abiaduraren (TS) eraginak aztertu dira. Gainera, hainbat funtzionamendu-moduren erabileraren analisia ere burutu da, kordoi bakarretan lortutako penetrazio, diluzio, mikroegitura eta gogortasunetan duten eragina ikertuz. Ikerketa honen bidez frogatu da Force Arc funtzionamendu-modua ez dela egokia prozesu gehigarrietarako, bero-ekarpen handia sortzen duelako. Aldiz, Cold Arc modua oso horma finak dituzten pieza zehatzak fabrikatzeko baino ez dago gomendatuta.

- 5- Bi ezarpen-estrategia alderatu dira, oszilazio-estrategia eta gainjartze-estrategia, geruzako hazkundeari, bero-ekarpenari, hozte- eta fabrikazio-denborei, makroegiturari, mikroegiturari, gogortasunei, propietate mekanikoei eta geometriari dagokienez. Esperimentazio horretatik ondorioztatu da estrategia oszilatuan energiaren eta beroaren kontzentrazioa handiagoa dela eta produktibitatea ere handitu egiten dela. Lortutako mikroegiturari dagokionez, desberdinak dira bi estrategietan eta UTS eta YS balioak handiagoak dira horma gainjarrian oszilatuan baino, lortutako ale tamaina txikiagoa dela eta. Azkenik, hormaren goiko gainazaleko lautasuna hobetu egiten da oszilazio-estrategiaren erabilerari esker.
- 6- Aluminio-aleazioetarako egokiak diren funtzionamendu-moduen eragina aztertu da: GMAW pultsatua, Cold Arc eta AC pultsatua. Lan egiteko modu hauek alderatzeko, lehenik eta behin, hiru moduekin kordoi sortak fabrikatu dira, ondoren horma sinpleak egiteko parametro optimoak zehazteko. Hiru horma sinpleak geometriari, mikroegiturari eta porositateari dagokienez aztertu eta alderatu dira. Lortutako ondorio nagusia AC pultsatu moduaren bidez ezarritako materialean porositatea nabarmen murrizten dela da.
- 7- Horrez gain, kordoi sorta horiei esker, kordoiaren zabalera- eta altuera-ereduak ere kalkulatu dira, ezarpen-ibilbideak diseinatzeko oso erabilgarriak direnak.

Ikerketa lan honen emaitzekin, hamalau argitalpen egin dira aldizkari zientifiko ezberdinetan eta hitzaldi bat eman da kongresu nazional batean.

Argitalpenak egile nagusi gisara:

- ✓ **E. Aldalur**, F. Veiga, A. Suárez, J. Bilbao, A. Lamikiz, **Analysis of the wall geometry with different strategies for high deposition wire arc additive manufacturing of mild steel**, *Metals*. 10 (2020) 1-19, <https://doi.org/10.3390/met10070892>
- ✓ **E. Aldalur**, F. Veiga, A. Suárez, J. Bilbao, A. Lamikiz, **High deposition wire arc additive manufacturing of mild steel: Strategies and heat input effect on microstructure and mechanical properties**, *Journal of Manufacturing Processes*. 58 (2020) 615-626, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.060>
- ✓ **E. Aldalur**, A. Suárez, F. Veiga, **Metal transfer modes for Wire Arc Additive Manufacturing Al-Mg alloys: Influence of heat input in microstructure and porosity**, *Journal of Material Processing Technology*, 297 (2021) 117271, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117271>

- ✓ **E. Aldalur**, A. Panfilo, A. Suárez, J. M. Ugartemendia, **Hari metalikoetan eta arku elektrikoan oinarritutako fabrikazio-gehigarriko WAAM teknologiaren oinarriak eta aplikazioak**, EKAIA Euskal Herriko Unibertsitateko Zientzia eta Teknologia Aldizkaria. (2021), <https://doi.org/10.1387/ekaia.22367>
- ✓ **E. Aldalur**, A. Suárez, T. Artaza, F. Veiga, **Thermal expansion behaviour of Invar 36 alloy parts fabricated by wire-arc additive manufacturing** (Under review)

Ko-egile gisara:

- ✓ M. Casuso, F. Veiga, A. Suárez, T. Bhujangrao, **E. Aldalur**, T. Artaza, J. Amondarain, A. Lamikiz, **Model for the prediction of deformations in the manufacture of thin-walled parts by wire arc additive manufacturing technology**, Metals. 11 (2021), <https://doi.org/10.3390/met11050678>
- ✓ A. Suárez, **E. Aldalur**, F. Veiga, T. Artaza, I. Tabernero, A. Lamikiz, **Wire arc additive manufacturing of an aeronautic fitting with different metal alloys: From the design to the part**, Journal of Manufacturing Processes. 64 (2021) 188-197, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.01.012>
- ✓ F. Veiga, A. Suárez, **E. Aldalur**, I. Goenaga, J. Amondarain, **Wire arc additive manufacturing process for topologically optimized aeronautical fixtures**, 3D Printing and Additive Manufacturing, 0, 0, 2021, <https://doi.org/10.1089/3dp.2021.0008>
- ✓ F. Veiga, A. Suárez, **E. Aldalur**, T. Bhujangrao, **Effect of the Metal Transfer Mode on the Symmetry of Bead Geometry in WAAM Aluminum**, Symmetry, 2021, 13, 1245, <https://doi.org/10.3390/sym13071245>
- ✓ F. Veiga, A. Suárez, **E. Aldalur**, T. Artaza, **Wire arc additive manufacturing of Invar parts: bead geometry and melt pool monitoring**, Measurements, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110452>
- ✓ A. Suárez, T. Artaza, **E. Aldalur**, F. Veiga, **Effect of the heat input on wire-arc additive manufacturing of Invar 36 alloy: microstructure and mechanical properties** (Under review)
- ✓ A. Suárez, F. Veiga, T. Bhujangrao, **E. Aldalur**, **Study of the mechanical behavior of topologically optimized AW-DED aerospace fixtures** (Under review)

- ✓ A. Suárez, **E. Aldalur**, F. Veiga, P. Gomez, A. Panfilo, **Microstructure and Mechanical properties of Mild Steel-Stainless Steel Bimetallic Structures Built using Wire Arc Additive Manufacturing** (Under review)
- ✓ F. Veiga, A. Suarez, **E. Aldalur**, R. Abad, **Different path strategies for wire-arc additive manufacturing of crossing intersections from stainless steel SS316L-Si** (Under review)

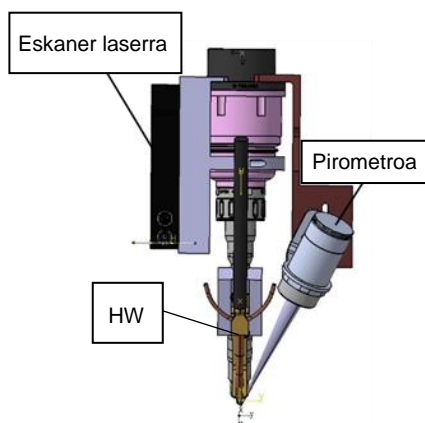
Kongresu nazionaletan ponentziak:

- ✓ **E. Aldalur**, A. Suárez, I. Tabernero, A. Lamikiz, **Desarrollo de la fabricación aditiva mediante arco eléctrico y aporte de hilo (WAAM) de alta deposición basado en GMAW**, Congreso de Máquina Herramienta (CMH), 2019.

2 Etorkizuneko ildoak

Doktore-tesi honetan landu den ikerketa-lerro honek GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren arlo gehiagotan lan egiteko ildo berriak irekitzen ditu. Horien artean, honako hauek nabarmendu behar dira:

- GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuan bigarren hari bero bat (HW) sartu daiteke, produktibitatea handitzeko eta material anitzeko piezak fabrikatzeko. VI-1. irudian ikusten den bezala, HWa, hari nagusiaren (elektrodoa) arku elektrikoak sortutako bainu urtuan sartzen den bigarren hari bat da. Bigarren hari horri intentsitate baxua ezartzen zaio soilik berotzeko. Lehen hariaren arku elektrikoak sortutako bero soberakina aprobetxatzen da bigarrena urtzeko. Hala, material gehiago sar daiteke prozesuan, hozte-denborak murriztuz eta diluzioa txikituz. VI-1. irudian, egun aurrera eramaten ari diren ikerketetan egileak HWari dagokionez garatu duen hasierako ideia erakusten da, bigarren hari hori III. kapituluan diseinatutako sistema robotikoan txertatzeko.



VI-1. irudia. Doktore-tesi honetan garatu den sistema robotikoaren zuziaren irudikapena, HW gehituta

- Etorkizuneko ikerketetan doktore-tesi honetan garatutako sistema robotikoan prozesuan zehar lanean jardungo duten monitorizazio- eta -kontrol sistema gehiago integratzeko aukera balora liteke prozesua hobeto kontrolatzeko. Aukera interesgarria litzateke baina urtua neurtu eta kontrolatu dezakeen kamera termografiko bat gehitzea prozesuari eta beronek lortzen dituen datuei esker akatsak saihestu eta prozesua kontrolatzea.
- Doktore-tesi honetan, kordioen zabalera eta altuera ereduak sortu dira 5356 aluminio-aleaziorako. Eredu horiek material gehiagotara eta parametro-tarte handiagoetara hedatu beharko liriateke, oso baliagarriak baitira geruzen ibilbideak eta hazkundeak definitzeko.
- Etorkizuneko ikerketetan ezarpen-estrategia mota gehiago aztertu daitezke, fabrikatu beharreko geometriara hobeto egokitzeko eta ezarpen-denborak nahiz hozte eta hutsean mugitzeko denborak laburtzeko.
- Aztertu beharreko beste ildo bat, tesi honetan alde batera utzi diren hainbat ezarpen-parametroren eragina aztertzea litzateke. Izan ere, parametro guztiak kontuan hartzeak konplexutasun handia du. Hala, adibidez, tesi honetan, une oro zuzia substratuarekiko orientazio perpendikularrean erabili da, baina etorkizuneko azterketetan parametro hori aldatzea posible litzateke, ezarritako materialaren ezaugarrietan duen eragina ikusteko. Bestalde, etorkizuneko azterketetan, bi denbora bereziko prozesuaren erabilera ere aztertu beharko litzateke, material bakoitzerako arrapalen parametro onenak zehaztuz.
- Gainera, interesgarria litzateke NDT tekniken bidez GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuarekin ezarritako piezak aztertzea, haien osotasun metalurgikoa eta materialaren kalitatea ziurtatzeko. Bereziki, interesgarria izango litzateke horrelako teknikak aluminio-aleazioetan erabiltzea, mota honetako materialetan fabrikazio-gehiagarriko prozesuek berez sortzen duten porositatea sakonki aztertzeko.

- Azkenik, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez fabrikatutako piezetan beharrezkoak diren postprozesuak azter litezke, ondorengo mekanizazio prozesuak barne. Gainera, WAAM prozesua eta ondorengo mekanizazioa zinematika berean integrazeko gai diren makina hibridoen ideia ere planteatu daiteke.

ERREFERENTZIAK

ERREFERENTZIAK

- [Abe, 2020] Abe, T., Kaneko, J., & Sasahara, H. *Thermal sensing and heat input control for thin-walled structure building based on numerical simulation for wire and arc additive manufacturing*. Additive Manufacturing, 2020, 35, 101357.
- [ADDILAN, 2021] ADDILAN S.L., www.addilan.com, 2021.
- [Aldalur, 2020-a] Aldalur, E., Veiga, F., Suárez, A., Bilbao, J., & Lamikiz, A. *High deposition wire arc additive manufacturing of mild steel: Strategies and heat input effect on microstructure and mechanical properties*. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 58, 615–626.
- [Aldalur, 2020-b] Aldalur, E., Veiga, F., Suárez, A., Bilbao, J., & Lamikiz, A. *Analysis of the wall geometry with different strategies for high deposition wire arc additive manufacturing of mild steel*. Metals, 2020, 10(7), 1–19.
- [Aldalur, 2021-a] Aldalur, E., Panfilo, A., Suárez, A., & M. Ugartemendia, J. *Hari metalikoetan eta arku elektrikoan oinarritutako fabrikazio-gehigarriko WAAM teknologiaren oinarriak eta aplikazioak*. EKAIA Euskal Herriko Unibertsitateko Zientzia Eta Teknologia Aldizkaria, 2020.
- [Aldalur, 2021-b] Aldalur, E., Suárez, A., & Veiga, F. *Metal transfer modes for Wire Arc Additive Manufacturing Al-Mg alloys: Influence of heat input in microstructure and porosity*. Journal of Material Processing Technology, 2021, 297, 117271.
- [AML3D, 2021] AML3D. <https://aml3d.com/>, 2021.
- [AMPOWER, 2020] AMPOWER. <https://am-power.de/>, 2020.
- [Artaza, 2017] Artaza, T., Alberdi, A., Murua, M., Gorrotxategi, J., Frías, J., Puertas, G., ... Suárez, A. *Design and integration of WAAM technology and in situ monitoring system in a gantry machine*. Procedia Manufacturing, 2017, 13, 778–785.

- [Artaza, 2019] Artaza, T., Suárez, A., Murua, M., Garcia, J., Tabernero, I., & Lamikiz, A. *Wire Arc Additive Manufacturing of Mn4Ni2CrMo Conference Steel: Comparison of Mechanical and Metallographic Properties of PAW and GMAW*. *Procedia Manufacturing*, 2019, 41, 1071–1078.
- [Artaza, 2020-a] Artaza, Teresa, Bhujangrao, T., Suárez, A., Veiga, F., & Lamikiz, A. *Influence of Heat Input on the Formation of Laves Phases and Hot Cracking in Plasma Arc Welding (PAW) Additive Manufacturing of Inconel 718*. *Metals*, 2020, 1–17.
- [Artaza, 2020-b] Artaza, T., Suárez, A., Veiga, F., Braceras, I., Tabernero, I., Larrañaga, O., & Lamikiz, A. *Wire arc additive manufacturing Ti6Al4V aeronautical parts using plasma arc welding: Analysis of heat-treatment processes in different atmospheres*. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(6), 15454–15466.
- [Azarniya, 2019] Azarniya, A., Garmendia, X., Mirzaali, M. J., Yen, C., Ahn, J., Miranda, G., ... Zadpoor, A. A. *Additive manufacturing of Ti6Al4V parts through laser metal deposition (LMD): Process, microstructure, and mechanical properties*. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 804, 163–191.
- [Babu, 2024] Babu, S. S. (2004). *The mechanism of acicular ferrite in weld deposits*. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2024, 8(3–4), 267–278.
- [Bai, 2018] Bai, X., Colegrove, P., Ding, J., Zhou, X., Diao, C., Bridgeman, P., ... Williams, S. *Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in multilayer deposition of PAW-based wire and arc additive manufacturing*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 124, 504–516.
- [Bandyopadhyay, 2018] Bandyopadhyay, A., & Heer, B. *Additive manufacturing of multi-material structures*. *Materials Science and Engineering R: Reports*. 2018.
- [Baker, 1925] R. Baker. (1925). *Method of making decorative articles*. US Patent, 1–3.

- [Birmingham, 2018] Birmingham, M. J., Nicastro, L., Kent, D., Chen, Y., & Dargusch, M. S. *Optimising the mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by wire + arc additive manufacturing with post-process heat treatments*. Journal of Alloys and Compounds, 2018.
- [Bhatt, 2019] Bhatt, P. M., Kabir, A. M., Peralta, M., Bruck, H. A., & Gupta, S. K. *A robotic cell for performing sheet lamination-based additive manufacturing*. Additive Manufacturing, 2019, 27, 278–289.
- [Bhavar, 2014] Bhavar, V., Kattire, P., Patil, V., Khot, S., Gujar, K., & Singh, R. *A Review on Powder Bed Fusion Technology of Metal Additive Manufacturing*. Conference Paper, 2014.
- [Caballero, 2019] Caballero, A., Ding, J., Ganguly, S., & Williams, S. *Wire + Arc Additive Manufacture of 17-4 PH stainless steel: Effect of different processing conditions on microstructure, hardness, and tensile strength*. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 268, 54–62.
- [Casuso, 2021] Casuso, M., Veiga, F., Suárez, A., Bhujangrao, T., Aldalur, E., Artaza, T., ... Lamikiz, A. *Model for the prediction of deformations in the manufacture of thin-walled parts by wire arc additive manufacturing technology*. Metals, 2021, 11(5).
- [Chen, 2015] Chen, D., Chen, M., & Wu, C. *Effects of phase difference on the behavior of arc and weld pool in tandem P-GMAW*. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 225, 45–55.
- [Chen, 2017] Chen, J., Zong, R., Wu, C., Padhy, G. K., & Hu, Q. *Influence of low current auxiliary TIG arc on high speed TIG-MIG hybrid welding*. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 243, 131–142.
- [Chin, 2020] Chin, S. Y., Dikshit, V., Priyadarshini, B. M., & Zhang, Y. *Powder-based 3D printing for the fabrication of device with micro and mesoscale features*. Micromachines, 2020, 11(7), 29–40.
- [Choi, 1978] Choi, B. Y. C. L. *A Study of Microstructural Progression in As-Deposited Weld Metal*, 1978, 1–5.

- [Cong, 2015] Cong, B., Ding, J., & Williams, S. *Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3%Cu alloy*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76 (9–12), 1593–1606.
- [Cong, 2017] Cong, B., Qi, Z., Qi, B., Sun, H., Zhao, G., & Ding, J. *A Comparative Study of Additively Manufactured Thin Wall and Block Structure with Al-6.3%Cu Alloy Using Cold Metal Transfer Process*. Applied Sciences, 2017, 7(3), 275.
- [Cook, 2020] Cook, P. S., & Murphy, A. B. *Simulation of melt pool behaviour during additive manufacturing: Underlying physics and progress*. Additive Manufacturing, 2020, 31, 100909.
- [Craveiro, 2019] Craveiro, F., Duarte, J. P., Bartolo, H., & Bartolo, P. J. *Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0*. Automation in Construction, 2019, 103, 251–267.
- [Cunningham, 2018] Cunningham, C. R., Flynn, J. M., Shokrani, A., Dhokia, V., & Newman, S. T. *Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing*. Additive Manufacturing, 2018, 22, 672–686.
- [Damen, 2021] Damen Shipyard, <https://www.damen.com/>, 2021.
- [Delic, 2020] Delic, M., & Evers, D. R. *The effect of additive manufacturing adoption on supply chain flexibility and performance: An empirical analysis from the automotive industry*. International Journal of Production Economics, 2020, 228, 107689.
- [Denlinger, 2015] Denlinger, E. R., Heigel, J. C., Michaleris, P., & Palmer, T. A. *Effect of inter-layer dwell time on distortion and residual stress in additive manufacturing of titanium and nickel alloys*. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 215, 123–131.

- [Derekar, 2019] Derekar, K., Lawrence, J., Melton, G., Addison, A., Zhang, X., & Xu, L. *Influence of Interpass Temperature on Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) of Aluminium Alloy Components*. MATEC Web of Conferences, 2019, 269, 05001.
- [Derekar, 2018] Derekar, K. S. *A review of wire arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminium*. Materials Science and Technology, 2018.
- [Derekar, 2020] Derekar, Karan S., Addison, A., Joshi, S. S., Zhang, X., Lawrence, J., Xu, L., ... Griffiths, D. *Effect of pulsed metal inert gas (pulsed-MIG) and cold metal transfer (CMT) techniques on hydrogen dissolution in wire arc additive manufacturing (WAAM) of aluminium*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(1–2), 311–331.
- [Dev Singh, 2020] Dev Singh, D., Mahender, T., & Raji Reddy, A. *Powder bed fusion process: A brief review*. Materials Today: Proceedings, 2020, 2–7.
- [Dhinakaran, 2020] Dhinakaran, V., Ajith, J., Fathima Yasin Fahmidha, A., Jagadeesha, T., Sathish, T., & Stalin, B. *Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) process of nickel based superalloys- A review*. Materials Today: Proceedings, 2020, 21, 920–925.
- [Dilberoglu, 2017] Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., & Dolen, M. *The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0*. Procedia Manufacturing, 2017, 11, 545–554.
- [Ding, 2015-a] Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., & Li, H. *A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM)*. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2015, 31, 101–110.
- [Ding, 2015-b] Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., & Li, H. *Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81, 465–481.

- [Dinovitzer, 2019] Dinovitzer, M., Chen, X., Laliberte, J., Huang, X., & Frei, H. *Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstructure*. Additive Manufacturing, 2019, 26, 138–146.
- [Dirisu, 2019] Dirisu, P., Ganguly, S., Mehmanparast, A., Martina, F., & Williams, S. *Analysis of fracture toughness properties of wire + arc additive manufactured high strength low alloy structural steel components*. Materials Science and Engineering A, 2019, 765, 138285.
- [Dos Santos, 2017] Dos Santos, E. B. F., Pistor, R., & Gerlich, A. P. *High frequency pulsed gas metal arc welding (GMAW-P): The metal beam process*. Manufacturing Letters, 2017 11, 1–4.
- [Ermakova, 2019] Ermakova, A., Mehmanparast, A., & Ganguly, S. *A review of present status and challenges of using additive manufacturing technology for offshore wind applications*. Procedia Structural Integrity, 2019, 17, 29–36.
- [Everton, 2016] Everton, S. K., Hirsch, M., Stavroulakis, P. I., Leach, R. K., & Clare, A. T. *Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing*. Materials and Design, 2016, 95, 431–445.
- [EWM, 2021] EWM. *EWM Hightec Welding*. <http://www.ewm-group.com>, 2021.
- [ExOne, 2021] ExOne. *X1 160Pro ExOne*. <https://www.exone.com/en-US/X1-160Pro>, 2021.
- [Eyers, 2017] Eyers, D. R., & Potter, A. T. *Industrial Additive Manufacturing: A manufacturing systems perspective*. Computers in Industry, 2017, 92–93, 208–218.
- [Fang, 2012] Fang, C. fu, Meng, X. hui, Hu, Q. xian, Wang, F. jiang, Ren, H., Wang, H. song, ... Mao, M. *TANDEM and GMAW Twin Wire Welding of Q690 Steel Used in Hydraulic Support*. Journal of Iron and Steel Research International, 2012, 19(5), 79–85.

- [Fang, 2021] Fang, X., Zhang, L., Chen, G., Huang, K., Xue, F., Wang, L., ... Lu, B. *Microstructure evolution of wire-arc additively manufactured 2319 aluminum alloy with interlayer hammering.* Materials Science and Engineering A, 2021, 800(99), 140168.
- [Ferraresi, 2003] Ferraresi, V. A., Figueiredo, K. M., & Ong, T. H. *Metal transfer in the aluminum gas metal arc welding.* Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2003, 25(3), 229–234.
- [Frazier, 2014] Frazier, W. E. *Metal additive manufacturing: A review.* Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(6), 1917–1928.
- [Fronius, 2021] Fronius, <https://www.fronius.com/es-es/spain>, 2021.
- [GEFERTEC, 2021] GEFERTEC, <https://www.gefertec.de/>, 2021.
- [General Electric, 2017] General Electric, *GE Global Research, 3D Printing New Parts for Aircraft Engines, 2017.*
- [GE Additive, 2021-a] General Electric Additive,. X Line 2000R-Concept Laser. <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/machines/dmlm-machines/x-line-2000r>, 2021.
- [GE Additive, 2021-b] General Electric Additive. Arcam EBM Spectra L. <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/machines/arcam-ebm-spectra-l>, 2021.
- [Geng, 2017] Geng, H., Li, J., Xiong, J., Lin, X., & Zhang, F. *Optimization of wire feed for GTAW based additive manufacturing.* Journal of Materials Processing Technology, 2017, 243, 40–47.
- [Ghaffari, 2019] Ghaffari, M., Vahedi Nemani, A., Rafieazad, M., & Nasiri, A. *Effect of Solidification Defects and HAZ Softening on the Anisotropic Mechanical Properties of a Wire Arc Additive-Manufactured Low-Carbon Low-Alloy Steel Part.* Jom, 2019, 71(11), 4215–4224.

- [Gisario, 2019] Gisario, A., Kazarian, M., Martina, F., & Mehrpouya, M. *Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review*. Journal of Manufacturing Systems, 2019, 53, 124–149.
- [Gokuldoss, 2017] Gokuldoss, P. K., S. K. and J. E. *Additive Manufacturing Processes : Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting — Selection Guidelines*. Materials, 2017, 10(672).
- [González, 2017] González, H., Arrizubieta, I., Calleja, A., Ruiz, J. E., & Lamikiz, A. *CAM development for additive manufacturing in turbo-machinery components*. Procedia Manufacturing, 2017, 13, 802–809.
- [Greer, 2019] Greer, C., Nycz, A., Noakes, M., Richardson, B., Post, B., Kurfess, T., & Love, L. *Introduction to the design rules for Metal Big Area Additive Manufacturing*. Additive Manufacturing, 2019, 27, 159–166.
- [Grong, 1986] Grong, O., & Matlock, D. K. *Microstructural development in mild and low-alloy steel weld metals*. International Metals Reviews, 1986, 31(1), 27–48.
- [Gu, 2014] Gu, J., Cong, B., Ding, J., Williams, S. W., & Zhai, Y. *WIRE+ARC additive manufacturing of aluminium. 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium; An Additive Manufacturing Conference, SFF 2014*, 451–458.
- [Gu, 2016] Gu, J., Ding, J., Williams, S. W., Gu, H., Ma, P., & Zhai, Y. *The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys*. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 230, 26–34.
- [Gu, 2018] Gu, J., Wang, X., Bai, J., Ding, J., Williams, S., Zhai, Y., & Liu, K. *Deformation microstructures and strengthening mechanisms for the wire+arc additively manufactured Al-Mg4.5Mn alloy with inter-layer rolling*. Materials Science and Engineering A, 2018, 712, 292–301.

- [Gu, 2019] Gu, J., Gao, M., Yang, S., Bai, J., Ding, J., & Fang, X. *Pore formation and evolution in wire + arc additively manufactured 2319 Al alloy*. Additive Manufacturing, 2019, 30, 100900.
- [Gu, 2020] Gu, J., Yang, S., Gao, M., Bai, J., Zhai, Y., & Ding, J. *Micropore evolution in additively manufactured aluminum alloys under heat treatment and inter-layer rolling*. Materials and Design, 2020, 186, 108288.
- [Günther, 2018-a] Günther, K., Bergmann, J. P., Zhang, C., Rosenberger, M., & Notni, G. *Hot Wire-Assisted Gas Metal Arc Welding of Ni-Based Hardfacing*. Welding Journal, 2018, 97, 99–107.
- [Günther, 2018-b] Günther, K., Bergmann, J. P., & Suchodoll, D. *Hot wire-assisted gas metal arc welding of hypereutectic FeCrC hardfacing alloys: Microstructure and wear properties*. Surface and Coatings Technology, 2018, 334, 420–428.
- [Guo, 2013] Guo, N., & Leu, M. C. *Additive manufacturing : technology , applications and research needs*. Front. Mech. Eng., 2013, 8(3), 215–243.
- [Haden, 2017] Haden, C. V., Zeng, G., Carter, F. M., Ruhl, C., Krick, B. A., & Harlow, D. G. *Wire and arc additive manufactured steel: Tensile and wear properties*. Additive Manufacturing, 2017, 16, 115–123.
- [Hao, 2021] Hao, B., & Lin, G. *Additive manufacturing technology and its application in die manufacturing*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 632, 022077.
- [Harrop, 2020] Harrop, J., & Collins, R. *3D Printing and Additive Manufacturing 2020-2030: COVID Edition*, 2020, Idtechex report.
- [Haselhuhn, 2016] Haselhuhn, A. S., Buhr, M. W., Wijnen, B., Sanders, P. G., & Pearce, J. M. *Structure-property relationships of common aluminum weld alloys utilized as feedstock for GMAW-based 3-D metal printing*. Materials Science and Engineering A, 2016.

- [Hauser, 2020] Hauser, T., Silva, A. Da, Reisch, R. T., Volpp, J., Kamps, T., & Kaplan, A. F. H. *Fluctuation effects in Wire Arc Additive Manufacturing of aluminium analysed by high-speed imaging*. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56, 1088–1098.
- [He, 2016] He, Y., Xu, Y., Chen, Y., Chen, H., & Chen, S. *Weld seam profile detection and feature point extraction for multi-pass route planning based on visual attention model*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 37, 251–261.
- [Hejripour, 2019] Hejripour, F., Binesh, F., Hebel, M., & Aidun, D. K. *Thermal modeling and characterization of wire arc additive manufactured duplex stainless steel*. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 272, 58–71.
- [Herderick, 2011] Herderick, E. *Additive manufacturing of metals: A review*. Materials Science and Technology Conference, 2011, 2(176252), 1413–1425.
- [Herzog, 2016] Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., & Emmelmann, C. *Additive manufacturing of metals*. Acta Materialia, 2016, 117, 371–392.
- [Horgar, 2018] Horgar, A., Fostervoll, H., Nyhus, B., Ren, X., Eriksson, M., & Akselsen, O. M. *Additive manufacturing using WAAM with AA5183 wire*. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 259, 68–74.
- [Hosseini, 2019] Hosseini, E., & Popovich, V. A. *A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718*. Additive Manufacturing, 2019, 30, 100877.
- [Hu, 2021] Hu, Z., Hua, L., Qin, X., Ni, M., Ji, F., & Wu, M. *Molten pool behaviors and forming appearance of robotic GMAW on complex surface with various welding positions*. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64, 1359–1376.

- [Hughes, 2019] Hughes, J. P., Dos Santos, P. L., Down, M. P., Foster, C. W., Bonacin, J. A., Keefe, E. M., ... Banks, C. E. *Single step additive manufacturing (3D printing) of electrocatalytic anodes and cathodes for efficient water splitting*. Sustainable Energy and Fuels, 2019, 4(1), 302–311.
- [INTEGRADDE, 2021] INTEGRADDE project. <http://www.integraddeproject.eu/>.
- [ISO/ASTM, 2015] ISO/ASTM. *ISO/ASTM 52900: Additive manufacturing - General principles - Terminology*. International Standard, 2015, 5, 1–26.
- [Jafari, 2021] Jafari, D., Vaneker, T. H. J., & Gibson, I. *Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts*. Materials and Design, 2021, 202, 109471.
- [Jafferson, 2021] Jafferson, J. M., & Chatterjee, D. *A review on polymeric materials in additive manufacturing*. Materials Today: Proceedings, 2021.
- [Jardon, 2020] Jardon, Z., Guillaume, P., Ertveldt, J., Hinderdael, M., & Arroud, G. *Offline powder-gas nozzle jet characterization for coaxial laser-based Directed Energy Deposition*. Procedia CIRP, 2020, 94, 281–287.
- [Jia, 2020] Jia, C., Liu, W., Chen, M., Guo, M., Wu, S., & Wu, C. *Investigation on arc plasma, droplet, and molten pool behaviours in compulsively constricted WAAM*. Additive Manufacturing, 2020, 34, 101235.
- [Jin, 2020] Jin, W., Zhang, C., Jin, S., Tian, Y., Wellmann, D., & Liu, W. *Wire arc additive manufacturing of stainless steels: A review*. Applied Sciences, 2020, 10(5).
- [Kah, 2013] Kah, P., Suoranta, R., & Martikainen, J. *Advanced gas metal arc welding processes*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(1–4), 655–674.

- [Karlsson, 2019] Karlsson, D., Lindwall, G., Lundbäck, A., Amnebrink, M., Boström, M., Riekehr, L., ... Jansson, U. *Binder Jetting of the AlCoCrFeNi Alloy*. Additive Manufacturing, 2019.
- [Kim, 1993] Kim, Y.-S., & Eagar, T. W. *Metal Transfer in Pulsed Current Gas Metal Arc Welding*. Welding Research Supplement, 1993, 279–287.
- [Kittel, 2020] Kittel, J., Gasser, A., Wissenbach, K., Zhong, C., Schleifenbaum, J. H., Palm, F., ... Siadat, A. *Case study on AM of an IN718 aircraft component using the LMD process*. Procedia CIRP, 2020, 94, 324–329.
- [Klein, 2020] Klein, T., Schnall, M., Gomes, B., Warczok, P., Fleischhacker, D., & Morais, P. J. *Wire-arc additive manufacturing of a novel high-performance Al-Zn-Mg-Cu alloy: Processing, characterization and feasibility demonstration*. Additive Manufacturing, 2020, 101663.
- [Kunchala, 2018] Kunchala, P., & Kappagantula, K. *3D printing high density ceramics using binder jetting with nanoparticle densifiers*. Materials and Design, 2018, 155, 443–450.
- [Lee, 2017] Lee, J. Y., An, J., & Chua, C. K. *Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials*. Applied Materials Today, 2017, 7, 120–133.
- [Lee, 2013] Lee, K. B., Kim, C., & Kim, D. S. *High deposition rate pulse gas metal arc welding for Al 5083 thick plate*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2013, 227(6), 848–854.
- [Li, 2019] Li, N., Huang, S., Zhang, G., Qin, R., Liu, W., Xiong, H., ... Blackburn, J. *Progress in additive manufacturing on new materials: A review*. Journal of Materials Science and Technology, 2019, 35(2), 242–269.
- [Li, 2020-a] Li, C., Gu, H., Wang, W., Wang, S., Ren, L., & Wang, Z. *Effect of Heat Input on Formability , Microstructure , and Properties of Al-7Si-0.6Mg Alloys Deposited by CMT-WAAM Process*. Applied Sciences, 2020, 10, 70.

- [Li, 2020-b] Li, S., Zhang, L. J., Ning, J., Wang, X., Zhang, G. F., Zhang, J. X., ... Fatemeh, B. *Comparative study on the microstructures and properties of wire+arc additively manufactured 5356 aluminium alloy with argon and nitrogen as the shielding gas*. Additive Manufacturing, 2020, 34, 101206.
- [Liang, 2018] Liang, Z., Jinglong, L., Yi, L., Jingtao, H., Chengyang, Z., Jie, X., & Dong, C. *Characteristics of metal droplet transfer in wire-arc additive manufacturing of aluminum alloy*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018.
- [Liberini, 2017] Liberini, M., Astarita, A., Campatelli, G., Scippa, A., Montevecchi, F., Venturini, G., ... Squillace, A. *Selection of Optimal Process Parameters for Wire Arc Additive Manufacturing*. In Procedia CIRP, 2017, 470–474.
- [Lincoln Electric Additive, 2021] Lincoln Electric Additive. <https://additive.lincolnelectric.com/>, 2021.
- [Lu, 2018] Lu, X., Lin, X., Chiumenti, M., Cervera, M., Li, J. J., Ma, L., ... Huang, W. *Finite element analysis and experimental validation of the thermomechanical behavior in laser solid forming of Ti-6Al-4V*. Additive Manufacturing, 2018, 21, 30–40.
- [Luo, 2018] Luo, Y., Li, J., Xu, J., Zhu, L., Han, J., & Zhang, C. *Influence of pulsed arc on the metal droplet deposited by projected transfer mode in wire-arc additive manufacturing*. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 259, 353–360.
- [Ma, 2019] Ma, G., Zhao, G., Li, Z., Yang, M., & Xiao, W. *Optimization strategies for robotic additive and subtractive manufacturing of large and high thin-walled aluminum structures*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101, 1275–1292.
- [Martina, 2015-a] Martina, F., & Williams, S. *Wire + arc additive manufacturing vs. traditional machining from solid: a cost comparison*, 2015.

- [Martina, 2015-b] Martina, F., Colegrove, P. A., Williams, S. W., & Meyer, J. *Microstructure of Interpass Rolled Wire + Arc Additive Manufacturing Ti-6Al-4V Components*. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 2015, 46(12), 6103–6118.
- [Martina, 2018] Martina, F., Ding, J., Williams, S., Caballero, A., Pardal, G., & Quintino, L. *Tandem Metal Inert Gas process for high productivity Wire Arc Additive Manufacturing in stainless steel*. Additive Manufacturing, 2018.
- [McAndrew, 2018] McAndrew, A. R., Alvarez Rosales, M., Colegrove, P. A., Hönnige, J. R., Ho, A., Fayolle, R., ... Pinter, Z. *Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement*. Additive Manufacturing, 2018, 21, 340–349.
- [McWilliams, 2017] McWilliams, A., & Spivey, C. *3D Metal Printing : Dark Art or Modern Blacksmith?*, 2017.
- [Michel, 2019] Michel, F., Lockett, H., Ding, J., Martina, F., Marinelli, G., & Williams, S. *A modular path planning solution for Wire + Arc Additive Manufacturing*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 60, 1–11.
- [Montevecchi, 2018] Montevecchi, F., Venturini, G., Grossi, N., Scippa, A., & Campatelli, G. *Idle time selection for wire-arc additive manufacturing: A finite element-based technique*. Additive Manufacturing, 2018, 21, 479–486.
- [Mughal, 2005] Mughal, M. P., Fawad, H., Mufti, R. A., & Siddique, M. *Deformation modelling in layered manufacturing of metallic parts using gas metal arc welding: Effect of process parameters*. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2005, 13(7), 1187–1204.
- [MX3D, 2021] MX3D. <https://mx3d.com/>, 2021.
- [Nagesh, 2002] Nagesh, D. S., & Datta, G. L. *Prediction of weld bead geometry and penetration in shielded metal-arc welding using artificial neural networks*. Journal of Materials Processing Technology, 2002.

- [Nassan, 2003] Nassan, J. *Gas Metal Arc Welding: Process Overview*, 96. Lincoln Electric.
- [Ng, 2009] Ng, G. K. L., Jarfors, A. E. W., Bi, G., & Zheng, H. Y. *Porosity formation and gas bubble retention in laser metal deposition*. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 97(3), 641–649.
- [Oliveira, 2020] Oliveira, J. P., Santos, T. G., & Miranda, R. M. *Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: From theory to practice*. *Progress in Materials Science*, 2020, 107, 100590.
- [Pan, 2018] Pan, Z., Ding, D., Wu, B., Cuiuri, D., Li, H., & Norrish, J. *Arc Welding Processes for Additive Manufacturing: A Review*. *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing*, 2018.
- [Panchenko, 2020] Panchenko, O., Kurushkin, D., Mushnikov, I., Khismatullin, A., & Popovich, A. *A high-performance WAAM process for Al–Mg–Mn using controlled short-circuiting metal transfer at increased wire feed rate and increased travel speed*. *Materials and Design*, 2020, 195, 109040.
- [Paolini, 2019] Paolini, A., Kollmannsberger, S., & Rank, E. *Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods*. *Additive Manufacturing*, 2019, 30, 100894.
- [Parandoush, 2017] Parandoush, P., & Lin, D. *A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites*. *Composite Structures*, 2017, 182, 36–53.
- [Ponche, 2014] Ponche, R., Kerbrat, O., Mognol, P., & Hascoet, J. Y. *A novel methodology of design for Additive Manufacturing applied to Additive Laser Manufacturing process*. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2014, 30(4), 389–398.
- [Prado-Cerqueira, 2017] Prado-Cerqueira, J. L., Diéguez, J. L., & Camacho, A. M. *Preliminary development of a Wire and Arc Additive Manufacturing system (WAAM)*. *Procedia Manufacturing*, 2017, 13, 895–902.

- [Pragana, 2021] Pragana, J. P. M., Sampaio, R. F. V., Bragança, I. M. F., Silva, C. M. A., & Martins, P. A. F. Hybrid metal additive manufacturing: A state-of-the-art review. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 2021, 2, 100032.
- [Qi, 2018] Qi, Z., Cong, B., Qi, B., Sun, H., Zhao, G., & Ding, J. *Microstructure and mechanical properties of double-wire + arc additively manufactured Al-Cu-Mg alloys*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018.
- [Queguineur, 2018] Queguineur, A., Rückert, G., Cortial, F., & Hascoët, J. Y. *Evaluation of wire arc additive manufacturing for large-sized components in naval applications*. *Welding in the World*, 2018, 62(2), 259–266.
- [RAMLAB, 2021] RAMLAB, <https://www.ramlab.com/case-studies/>.
- [Rezvani, 2021] Rezvani Ghomi, E., Khosravi, F., Neisiany, R. E., Singh, S., & Ramakrishna, S. *Future of additive manufacturing in healthcare*. *Current Opinion in Biomedical Engineering*, 2021, 17, 100255.
- [Rodrigues, 2019-a] Rodrigues, T. A., Duarte, V., Avila, J. A., Santos, T. G., Miranda, R. M., & Oliveira, J. P. *Wire and arc additive manufacturing of HSLA steel: Effect of thermal cycles on microstructure and mechanical properties*. *Additive Manufacturing*, 2019, 27, 440–450.
- [Rodrigues, 2019] Rodrigues, T. A., Duarte, V., Miranda, R. M., Santos, T. G., & Oliveira, J. P. *Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM)*. *Materials*, 2019, 12, 1121.
- [Saboori, 2019] Saboori, A., Aversa, A., Marchese, G., Biamino, S., Lombardi, M., & Fino, P. *Application of directed energy deposition-based additive manufacturing in repair*. *Applied Sciences*, 2019, 9(16).
- [Sahasrabudhe, 2018-a] Sahasrabudhe, O. S., & Raut, D. *Effect of heat source positioning on hybrid TIG-MAG arc welding process*. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(9), 18518–18526.

- [Sahasrabudhe, 2018-a] Sahasrabudhe, O. S., & Raut, D. N. *Analytic framework on parameter ranking for hybrid TIG MAG arc welding of mild steel*. Journal of Advanced Research, 2018, 12, 27–37.
- [Sames, 2016] Sames, W. J., List, F. A., Pannala, S., Dehoff, R. R., & Babu, S. S. *The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing*. International Materials Reviews, 2016, 61(5), 315–360.
- [Satish Prakash, 2018] Satish Prakash, K., Nancharaih, T., & Subba Rao, V. V. *Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing - An Overview*. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(2), 3873–3882.
- [SCI AKY, 2021] Sciaky, *Sciaky, powder vs wire*. <https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/wire-vs-powder>, 2021.
- [Scotti, 2012] Scotti, A., Ponomarev, V., & Lucas, W. *A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMAW welding*. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(6), 1406–1413.
- [Scotti, 2014] Scotti, A., Ponomarev, V., & Lucas, W. *Interchangeable metal transfer phenomenon in GMA welding: Features, mechanisms, classification*. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(11), 2488–2496.
- [Scotti, 2020] Scotti, F. M., Teixeira, F. R., Silva, L. J. da, de Araújo, D. B., Reis, R. P., & Scotti, A. *Thermal management in WAAM through the CMT Advanced process and an active cooling technique*. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 57, 23–35.
- [Selvi, 2018] Selvi, S., Vishvaksenan, A., & Rajasekar, E. *Cold metal transfer (CMT) technology - An overview*. Defence Technology, 2018, 14(1), 28–44.
- [Shassere, 2019] Shassere, B., Nycz, A., Noakes, M. W., Masuo, C., & Sridharan, N. *Correlation of microstructure and mechanical properties of Metal Big Area Additive Manufacturing*. Applied Sciences, 2019, 9(4).

- [Sheoran, 2020] Sheoran, A. J., Kumar, H., Arora, P. K., & Moona, G. *Bio-medical applications of additive manufacturing: A review*. *Procedia Manufacturing*, 2020, 51, 663–670.
- [Shi, 2020] Shi, G., Guan, C., Quan, D., Wu, D., Tang, I., & Gao, T. *An aerospace bracket designed by thermo-elastic topology optimization and manufactured by additive manufacturing*. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 33(4), 1252–1259.
- [Shukla, 2020] Shukla, P., Dash, B., Kiran, D. V., & Bukkapatnam, S. *Arc Behavior in Wire Arc Additive Manufacturing Process*. *Procedia Manufacturing*, 2020, 48, 725–729.
- [Simchi, 2003] Simchi, A., Petzoldt, F., & Pohl, H. *On the development of direct metal laser sintering for rapid tooling*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 141(3), 319–328.
- [Singh, 2019] Singh, R., Gupta, A., Tripathi, O., Srivastava, S., Singh, B., Awasthi, A., ... Saxena, K. K. *Powder bed fusion process in additive manufacturing: An overview*. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 26, 3058–3070.
- [Singh, 2020] Singh, S. R., & Khanna, P. *Wire arc additive manufacturing (WAAM): A new process to shape engineering materials*. *Materials Today: Proceedings*, 2020.
- [Somashekara, 2017] Somashekara, M. A., & Suryakumar, S. *Studies on Dissimilar Twin-Wire Weld-Deposition for Additive Manufacturing Applications*. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2017, 70(8), 2123–2135.
- [Starke, 2010] Starke, E. A., & Staley, J. T. *Application of modern aluminium alloys to aircraft. Fundamentals of Aluminium Metallurgy: Production, Processing and Applications*, 2010, Woodhead Publishing Limited.
- [Su, 2019] Su, C., Chen, X., Gao, C., & Wang, Y. *Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of Al-Mg alloys fabricated by WAAM*. *Applied Surface Science*, 2019, 486, 431–440.

- [Suárez, 2021] Suárez, A., Aldalur, E., Veiga, F., Artaza, T., Tabernero, I., & Lamikiz, A. *Wire arc additive manufacturing of an aeronautic fitting with different metal alloys: From the design to the part*. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64, 188–197.
- [Subramaniam, 1999] Subramaniam, S., White, D. R., Jones, J. E., & Lyons, D. W. *Experimental approach to selection of pulsing parameters in pulsed GMAW*. Welding Journal (Miami, Fla), 1999, 78(5), 166–172.
- [Sun, 2021] Sun, C., Wang, Y., McMurtrey, M. D., Jerred, N. D., Liou, F., & Li, J. *Additive manufacturing for energy: A review*. Applied Energy, 2021, 282.
- [Tabernero, 2018] Tabernero, I., Paskual, A., Álvarez, P., & Suárez, A. *Study on Arc Welding Processes for High Deposition Rate Additive Manufacturing*. Procedia CIRP, 2018, 68, 358–362.
- [Taşdemir, 2020] Taşdemir, A., & Nohut, S. *An overview of wire arc additive manufacturing (WAAM) in shipbuilding industry*. Ships and Offshore Structures, 2020, 0(0), 1–18.
- [Tofail, 2018] Tofail, S. A. M., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., & Charitidis, C. *Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities*. Materials Today, 2018, 21(1), 22–37.
- [Udroiu, 2012] Udroiu, R. *Powder Bed Additive Manufacturing Systems and its applications*. Academic Journal of Manufacturing Engineering, 2012, 10(4), 122–129.
- [UNE-EN ISO 148-1] Materiales metálicos. Ensayo de flexión por choque con péndulo Charpy. Parte 1: Método de ensayo, UNE-EN ISO 148-1, Abril 2016.
- [UNE-EN ISO 6507-1] Normalización Española, Materiales Metálicos. Ensayo de dureza Vickers. Parte 1: Método de ensayo, UNE- EN ISO 6507-1, October 2018.

- [UNE-EN ISO 6892- 1] Normalización Española, Materiales Metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente, UNE-EN ISO 6892- 1, February 2017.
- [Urhal, 2019] Urhal, P., Weightman, A., Diver, C., & Bartolo, P. *Robot assisted additive manufacturing: A review*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 59, 335–345.
- [Veiga, 2019] Veiga, F., Del Val, A. G., Suárez, A., & Alonso, U. *Analysis of the machining process of titanium Ti6Al-4V parts manufactured by wire arc additive manufacturing (WAAM)*. Materials, 2019, 13(3), 766.
- [Veiga, 2021] Veiga, F., Suárez, A., Aldalur, E., Goenaga, I., & Amondarain, J. *Wire arc additive manufacturing process for topologically optimized aeronautical fixtures*. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2021, 0, 0.
- [Venturini, 2016] Venturini, G., Montevecchi, F., Scippa, A., & Campatelli, G. *Optimization of WAAM Deposition Patterns for T-crossing Features*. Procedia CIRP, 2016, 55, 95–100.
- [Vimal, 2020] Vimal, K. E. K., Naveen Srinivas, M., & Rajak, S. *Wire arc additive manufacturing of aluminium alloys: A review*. Materials Today: Proceedings, 2020.
- [WAAMMAT, 2021] WAAMMAT, <https://waammat.com/>, 2021.
- [Wang, 2019] Wang, L., Xue, J., & Wang, Q. *Correlation between arc mode, microstructure, and mechanical properties during wire arc additive manufacturing of 316L stainless steel*. Materials Science and Engineering A, 2019, 751, 183–190.
- [Wang, 2017] Wang, Q., Qi, B., Cong, B., & Yang, M. *Output characteristic and arc length control of pulsed gas metal arc welding process*. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 29, 427–437.
- [Williams, 2016-a] Williams, S. *WAAM - Current and Future Developments*. In Defence IQ Additive Manufacturing for Aerospace, Defence and Space conference, 2016.

- [Williams, 2016-b] Williams, S. W., Martina, F., Addison, A. C., Ding, J., Pardal, G., & Colegrove, P. *Wire + Arc additive manufacturing*. *Materials Science and Technology*, 2016, 32(7), 641–647.
- [Wu, 2018-a] Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., & Li, H. *Effects of heat accumulation on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy deposited by wire arc additive manufacturing*. *Additive Manufacturing*, 2018, 23, 151–160.
- [Wu, 2018-b] Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., Xu, J., & Norrish, J. *A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement.* *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 35, 127–139.
- [Wu, 2004] Wu, C. S., Chen, M. A., & Li, S. K. *Analysis of excited droplet oscillation and detachment in active control of metal transfer*. *Computational Materials Science*, 2004, 31(1–2), 147–154.
- [Xia, 2020] Xia, C., Pan, Z., Polden, J., Li, H., Xu, Y., Chen, S., & Zhang, Y. *A review on wire arc additive manufacturing: Monitoring, control and a framework of automated system*. *Journal of Manufacturing Systems*, 2020, 57, 31–45.
- [Xiong, 2018] Xiong, J., Li, Y., Li, R., & Yin, Z. *Influences of process parameters on surface roughness of multi-layer single-pass thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 252, 128–136.
- [Xiong, 2016] Xiong, J., Yin, Z., & Zhang, W. *Closed-loop control of variable layer width for thin-walled parts in wire and arc additive manufacturing*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 233, 100–106.
- [Xiong, 2013] Xiong, J., & Zhang, G. *Online measurement of bead geometry in GMAW-based additive manufacturing using passive vision*. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(11).

- [Xu, 2019] Xu, X., Ding, J., Ganguly, S., Diao, C., & Williams, S. *Preliminary Investigation of Building Strategies of Maraging Steel Bulk Material Using Wire + Arc Additive Manufacture*. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28(2), 594–600.
- [Ya, 2018] Ya, W., & Hamilton, K. *On-Demand Spare Parts for the Marine Industry with Directed Energy Deposition: Propeller Use Case*. Industrializing Additive Manufacturing-Proceedings of Additive Manufacturing in Products and Applications - AMPA2017, 2018, 4.
- [Yang, 2016] Yang, D., He, C., & Zhang, G. *Forming characteristics of thin-wall steel parts by double electrode GMAW based additive manufacturing*. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 227, 153–160.
- [Yang, 2017] Yang, D., Wang, G., & Zhang, G. *Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography*. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 244, 215–224.
- [Yao, 2016] Yao, P., Xue, J., Zhou, K., Wang, X., & Zhu, Q. *Symmetrical transition waveform control on double-wire MIG welding*. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229, 111–120.
- [Yili, 2018] Yili, D., Shengfu, Y., Yusheng, S., Tianying, H., & Lichao, Z. *Wire and arc additive manufacture of high-building multi-directional pipe joint*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018 96(5–8), 2389–2396.
- [Zhang, 2019] Zhang, B., Zhang, L., Wang, C., Wang, Z., & Gao, Q. *Microstructure and properties of Al alloy ER5183 deposited by variable polarity cold metal transfer*. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 267, 167–176.
- [Zhang, 2018-a] Zhang, C., Li, Y., Gao, M., & Zeng, X. *Wire arc additive manufacturing of Al-6Mg alloy using variable polarity cold metal transfer arc as power source*. Materials Science and Engineering A, 2018, 711, 415–423.

- [Zhang, 2020-a] Zhang, G., Xiong, H., Yu, H., Qin, R., Liu, W., & Yuan, H. *Microstructure evolution and mechanical properties of wire-feed electron beam additive manufactured Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr alloy with different subtransus heat treatments*. *Materials and Design*, 2020, 195(8), 109063.
- [Zhang, 2020-b] Zhang, P., Li, G., Yan, H., & Tian, Y. *Effect of positive/negative electrode ratio on cold metal transfer welding of 6061 aluminum alloy*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 106(3–4), 1453–1464.
- [Zhang, 2020-c] Zhang, X., Wu, X., & Shi, J. *Additive manufacturing of zirconia ceramics: a state-of-the-art review*. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(4), 9029–9048.
- [Zhang, 2003] Zhang, Y. M., Chen, Y., Li, P., & Male, A. T. *Weld deposition-based rapid prototyping: A preliminary study*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 135(2-3 SPEC.), 347–357.
- [Zhang, 2002] Zhang, Y. M., Li, P., Chen, Y., & Male, A. T. *Automated system for welding-based rapid prototyping*. *Mechatronics*, 2002 12(1), 37–53.
- [Zhang, 2018-b] Zhang, Y., Wu, L., Guo, X., Kane, S., Deng, Y., Jung, Y. G., ... Zhang, J. *Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review*. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, 27(1), 1–13.
- [Zheng, 2021] Zheng, H., Qi, B., & Yang, M. *Dynamic analysis of the ultrasonic-frequency pulsed GMAW metal transfer process*. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 62, 283–290.
- [Zhu, 2021] Zhu, J., Zhou, H., Wang, C., Zhou, L., Yuan, S., & Zhang, W. *A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges*. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(1), 91–110.