

Aluminioaren gainazal-tratamenduaren eragina karbono-zuntzez indartutako Fiber Metal Laminates (FML) materialen propietate mekanikoetan espazio-aplikazioetarako

Influence of Aluminum Surface Treatment on the Mechanical Performance of Carbon Fiber Reinforced Fiber Metal Laminates for Space Applications

Mikel Ugarte Zuazua¹, Lorena Germán Ayuso¹, Rubén Seoane-Rivero^{1,2}

¹ GAIKER Tecnologia Zentroa, Basque Research and Technology Alliance (BRTA), Bizkaiko Parke Teknologikoa, 202 Eraikina, 48170 Zamudio, Euskal Herria

² Ingeniaritza Kimiko eta Ingurumen Ingeniaritzako Saila, Euskal Herriko Unibertsitatea (EHU), Urkixo Zumarkalea z/g, 48013 Bilbo, Euskal Herria

LABURPENA: Zuntz-metalezko laminatuak (Fiber Metal Laminates, FML) material hibrido aurreratuak dira, metalaren eta material konposatuaren propietateak konbinatzen dituztelako. Lan honen helburua aluminioari aplikatutako gainazal-tratamenduen eragina karbono-zuntzez indartutako FMLen atxikimenduan eta portaera mekanikoan duten eragina aztertzea izan da, espazio-sektorean erabil daitezkeen egitura arinak garatzeko. Laminatuak hutsean eta presiopean fabrikatu dira, 135 °C-ko tenperaturan eta 90 minutuko ontze-zikloa erabiliz. Ondoren, trakzio- eta Charpy inpaktu-saiakuntzak egin dira materialaren propietate mekanikoak eta geruzen arteko loturaren kalitatea ebaluatzeko. Trakzio-saiakuntzetan, NaOH bidez tratatutako laginek erresistentzia eta zurruntasun handiagoak erakutsi dituzte, 550 MPa-ko trakzio-erresistentzia maximoa lortuz. Gainera, lagin horiek emaitza homogeneoagoak aurkeztu dituzte, itsasgarritz lotutako laginek baino.

GAKO-HITZAK: FML, konposite, zuntz –metalezko laminatua, espazio

ABSTRACT: Fiber Metal Laminates (FMLs) are advanced hybrid materials that combine the properties of metals and composite materials. The aim of this work was to investigate the influence of aluminum surface treatments on the adhesion and mechanical performance of carbon fiber reinforced FMLs for the development of lightweight structures suitable for space applications. The laminates were manufactured under vacuum and pressure using a curing cycle of 90 min at 135 °C. Subsequently, tensile and Charpy impact tests were carried out to evaluate the mechanical properties of the material and the quality of the interlaminar bonding. Tensile test results showed that NaOH-treated specimens exhibited higher strength and stiffness, reaching a maximum tensile strength of 550 MPa. Furthermore, these samples showed more homogeneous behavior and lower scatter in the results than those bonded using an adhesive. These findings indicate that chemical surface treatment improves the quality of the metal–composite interface and enhances the overall mechanical performance of the laminates.

KEYWORDS: FML; composite; fiber metal laminate; space.

1

***Harremanetan jartzeko/ Corresponding author:** Rubén Seoane-Rivero. Ingeniaritza Kimiko eta Ingurumen Ingeniaritzako Saila, Euskal Herriko Unibertsitatea (EHU), Urkixo Zumarkalea z/g, 48013 Bilbo, Euskal Herria

 <https://orcid.org/0000-0002-0078-9617>; ruben.seoane@ehu.eus

Nola aipatu / How to cite: Ugarte Zuazua, Mikel; Germán Ayuso, Lorena; Seoane-Rivero, Rubén .(2026). << Aluminioaren gainazal-tratamenduaren eragina karbono-zuntzez indartutako Fiber Metal Laminates (FML) materialen propietate mekanikoetan espazio-aplikazioetarako>>, Ekaia, 50, xx-xx. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.28770>)

Jasoa: uztailak 9, 2026; Onartua: urriak 5, 2026

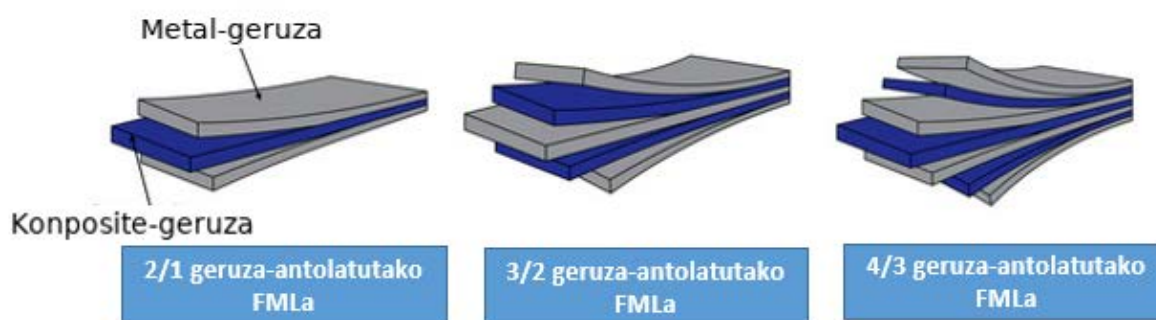
ISSN 0214-9001-eISSN 2444-3225 / © 2026 UPV/EHU



Obra Creative Commons Atribución 4.0 Internacional-en lizentziapean dago

1. SARRERA

Zuntz-metalezko laminatuak (Fiber Metal Laminates, FML) material hibrido aurreratuak dira, metalezko geruza meheak eta zuntzez indartutako polimero-konpositeen geruzak txandakatuz osatzen direnak [1,2], 1. irudian ikusten den bezala. Azken hamarkadetan arreta handia jaso dute industria aeroespazialean, automobilgintzan eta itsas sektorean, propietate mekaniko bikainak eta pisu txikia uztartzeko gaitasuna dutelako [3,4].



1. irudia. FML konfigurazioa

FMLen garapena 1980ko hamarkadan hasi zen Delft University of Technology-n, ARALL (Aramid Reinforced Aluminum Laminate) sistemarekin [5]. Laminatu horiek aramida-zuntzez indartutako aluminiozko geruzak erabiltzen zituzten, eta nekaeraren aurrean portaera bikaina eta inpaktuarekiko erresistentzia handia erakutsi zuten [5,6]. Ondoren, GLARE (Glass Reinforced Aluminum Laminate) eta CARALL (Carbon Reinforced Aluminum Laminate) sistemak garatu ziren [7,8]. Horietatik, GLARE da arrakasta industrial handiena izan duena, Airbus A380 hegazkinaren fuselajea erabili baita [9,10]. Bestalde, CARALL sistemak zurruntasun eta erresistentzia espezifiko handiagoak eskaintzen dituzte, baina fabrikazio konplexuagoa behar dute [11].

FMLen portaera zuntz motaren arabera da neurri handi batean. Beira-zuntzak dira gehien erabiltzen direnak kostu baxua eta ezaugarri mekaniko onak direla eta [12]. Karbono-zuntzek erresistentzia eta zurruntasun handiagoa eskaintzen dute, eta horregatik bereziki erakargarriak dira aplikazio aeroespazialean [13]. Aramida-zuntzak, berriz, inpaktu-energia xurgatzeko gaitasun handiagatik nabarmentzen dira [5]. Zuntzaren hautaketak zuzenean eragiten du laminatuaren pisuan, zurruntasunean, nekaerarekiko portaeran eta fabrikazio-kostuan.

Metalezko osagaiei dagokienez, aluminioa da gehien erabiltzen den metala, dentsitate baxua, korrosioarekiko erresistentzia eta fabrikazio-erraztasuna dituelako [14]. Hala ere, titanioan eta magnesioan oinarritutako laminatuak ere aztertu dira. Titaniozko FMLek erresistentzia estatiko handia eta nekaerarekiko portaera bikaina dute, baina haien inpaktuarekiko erresistentzia murriztu daiteke aleazioaren harikortasun txikiagoaren ondorioz [15]. Magnesiozko aleazioek, aldiz, dentsitate oso baxua eta propietate espezifiko bikainak eskaintzen dituzte, eta, ondorioz, interes handia piztu dute automobilgintza eta sektore aeroespazialean [16].

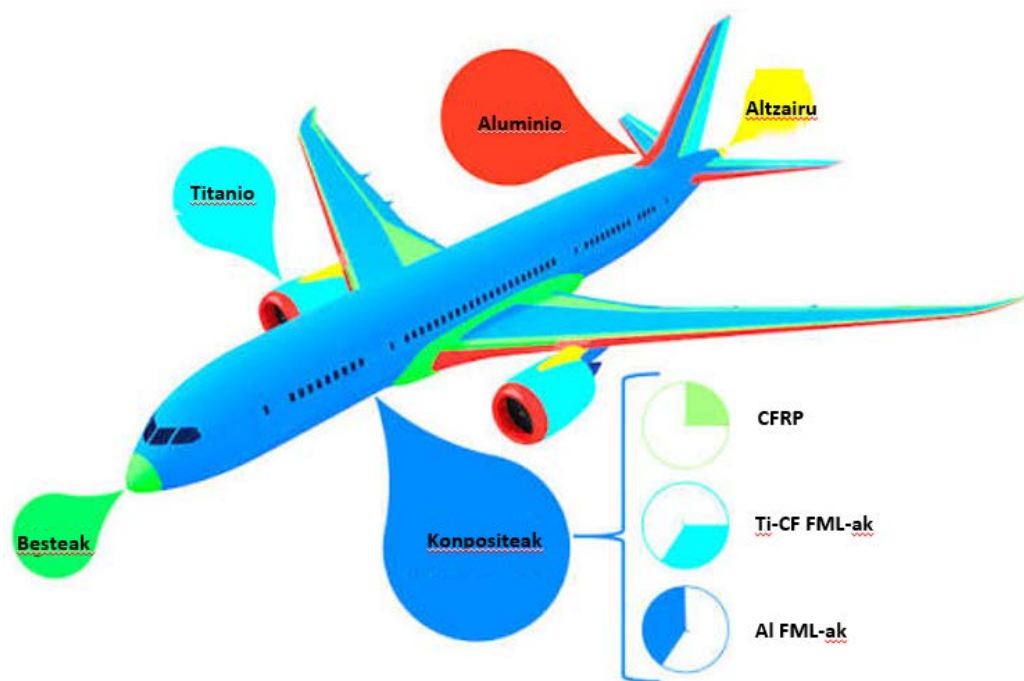
FMLen abantaila nagusia metalen eta konpositeen propietateak bateratzeko gaitasuna da. Metal monolitikoekin alderatuta, nekaerarekiko erresistentzia handiagoa dute, inpaktuen aurrean tolerantzia handiagoa eta korrosioarekiko portaera hobea eskaintzen dute [1,7]. Gainera, dentsitate txikiagoa dutenez, pisuaren murrizketa nabarmena lor daiteke. GLARE sistemen kasuan, aluminioarekin alderatuta %10 inguruko dentsitate-murrizketa lor daiteke, errendimendu mekanikoa mantenduz [24].

FMLen fabrikazioan gehien erabiltzen den prozesua autoklabe bidezko ontzea da [17]. Prozesuak metalezko gainazalen prestaketa, geruzen pilaketa (lay-up), hutsezko poltsaketa, tenperatura eta presio kontrolatuan ontzea eta azken ikuskapena barne hartzen ditu [17,18]. Kalitate handiko laminatuak lortzeko, tenperatura eta presioa parametro kritikoak dira. Normalean, 120 °C inguruko ontze-tenperaturak erabiltzen dira matrizearen biskositatea murriztu eta geruzen arteko lotura hobetzeko [17]. Autoklabe bidezko fabrikazioaz gain, beste teknika batzuk ere garatu dira. Horien artean daude press brake forming, incremental sheet forming, laser forming, shot peening forming eta resin transfer molding (RTM) teknikak [17,18]. Metodo horien helburu nagusia ekoizpen-denborak laburtzea eta geometria konplexuagoak fabrikatzea da. Azken urteetan, matrice termoplastikoetan oinarritutako FMLek ere interes handia piztu dute, prozesatze-denborak laburragoak baitituzte eta birziklapena errazten baitute [4].

FMLen erronka handienetako bat metalaren eta konpositearen arteko lotura sendoa lortzea da. Interfazearen kalitateak kargaren transferentzia, delaminazioaren aurkako erresistentzia eta propietate mekaniko orokorrak baldintzatzen ditu [19]. Horregatik, gainazalaren tratamenduak ikerketa-lerro nagusietako bat bihurtu dira. Tratamendu mekanikoek, hala nola urradura mekanikoak edo sandblasting teknikak, gainazalaren zimurtasuna handitzen dute eta lotura mekanikoa indartzen dute [20]. Frogatu da zimurtasun handiagoak oro har atxikimendu handiagoa eta lotura-indar handiagoa eragiten dituela [20]. Era berean, ildoak edo testura geometrikoak sortzeak lotura-indarra areagotzen du, karga mekanikoen transferentzia hobetuz [20].

Tratamendu kimiko eta elektrokimikoak ere oso erabilgarriak dira. Anodizazioak aluminioaren edo titanioaren gainazalean oxido-geruza porotsuak sortzen ditu, eta horrek bustigarritasuna eta atxikimendua handitzen ditu [21,22]. Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) eta Micro Arc Oxidation (MAO) prozesuek gainazal porotsuak sortzen dituzte, erretxinaren eta metalaren arteko lotura mekanikoa eta kimikoa hobetuz [22]. Sol-gel estaldurek eta plasma tratamenduek ere emaitza positiboak erakutsi dituzte interfaze-indarra handitzeko [21].

Azken urteotan, laser bidezko testurizazioa aukera erakargarri gisa agertu da. Laser bidez sortutako mikro- eta nanoegiturek gainazalaren energia handitu eta lotura mekanikoa hobetzen dute, atxikimenduaren kalitatea nabarmen areagotuz [23]. Propietate mekanikoei dagokienez, nekaerarekiko erresistentzia FMLen ezaugarri aipagarrienetako bat da. Zuntz-zubiketa (fiber bridging) izeneko mekanismoari esker, metalezko geruza pitzatueta sortutako tentsioak zuntz osasuntsuetara transferitzen dira [24]. Horren ondorioz, pitzaduren hedapena moteltzen da eta egituraren bizi-iraupena handitzen da. Ikerketek erakutsi dute GLARE sistemetan pitzaduren hazkundea aluminio monolitikoan baino 10 eta 100 aldiz motelagoa izan daitekeela [24,25].



2. irudia. Hegazkinen osagai nagusiak

Aplikazioen ikuspegitik, sektore aeroespaziala da gaur egun FMLen erabiltzaile nagusia [3,10]. Hegazkinen diseinuan pisuaren murrizketa eta segurtasuna funtsezko faktoreak dira eta, ondorioz, GLARE eta beste FML batzuk fuselajeetan, paneletan eta egitura primarioetan erabiltzen dira, 2. irudian agertzen den bezala [9,10]. Aluminio tradizionalarekin alderatuta, pisu txikiagoa lortzen dute, nekearen aurkako portaera hobearekin batera. Automobilgintzan ere joera bera ikus daiteke. Ibilgailuen masa murrizteak erregai-kontsumoa eta karbono dioxidoaren emisioak murrizten ditu [3]. Horregatik, fabrikatzaileek gero eta interes handiagoa dute FMLetan, segurtasuna mantenduz edo hobetuz pisu handiagoa aurrezten baitute [3].

Laburbilduz, zuntz-metalezko laminatuak gaur egungo material estruktural aurreratuenetakoak dira. Pisu txikia, nekaerarekiko erresistentzia handia, inpaktuarekiko tolerantzia eta korrosioarekiko portaera bikaina uztartzen dituzte. Horregatik, sektore aeroespazialean, automobilgintzan eta beste industria askotan erabilera gero eta handiagoa dute. Etorkizuneko garapenek gainazal-tratamendu berrietan, fabrikazio jasangarrian eta material bioinarrituetan jarriko dute arreta, FMLen errendimendu mekaniko bikaina mantenduz.

Lan honetan, aluminioari aplikatutako tratamenduek FMLaren geruzen arteko itsaspenan duten eragina ebaluatzea lortu da. Fabrikaziorako estrategiak definitu dira, eta egindako saiakuntzen emaitzak aztertu eta ebaluatu dira. Espazioan erabiliko diren egitura-materialen beharrak kontuan hartuta, konposite hibridoa osatzen duten material desberdinen arteko itsaspena errazteko hainbat aukera definitu dira. Hainbat konfigurazio, materialen lodiera eta tratamendu zehaztu dira, baita eraldaketa-prozesuan egindako aldaketak ere. Horretarako, materialak jasango dituen muturreko baldintzak kontuan hartu dira, eta lotura karakterizatzeko beharrezko saiakuntzak definitu dira. Laburbilduz, lan honetan FML berriak garatu dira, fabrikazio-prozesua hobetuz eta tratamenduak optimizatuz.

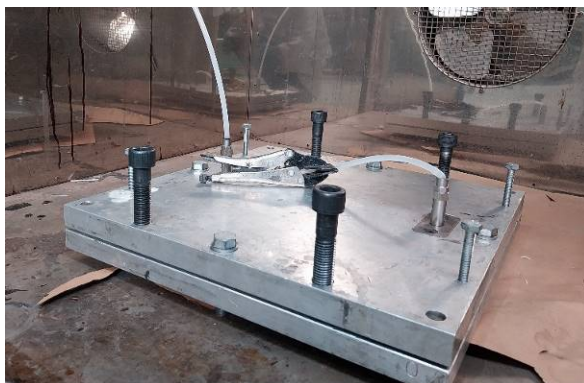
2. ESPAZIO-SEKTOREKO APLIKAZIOETARAKO KONPOSITE HIBRIDOEN (METAL-KONPOSITE) GARAPENA

2.1. Aluminioari egindako aurretratamenduak

Lan honen garapena NaOH bidez tratatutako aluminioarekin fabrikatutako FMLen eta itsasgarri bidez fabrikatutako FMLen azterketan oinarritu da. FMLak honako lehengai hauetatik abiatuta garatu dira:

- Karbono-Epoxi preprega 5157210000 SOLVAY MTM46-38-12KT700SC60E2X2T660-1250: tenperatura altuetarako diseinatutako epoxi-erretxina sistema da, zailtasun mekaniko (toughness) hobetua duena. Osagaien fabrikazioan malgutasun handia eskaintzen du.
- 6061-T6 aluminioa: espazio-ontzien egituretan eta sateliteen gainazaletan erabiltzen da. AA6061 6xxx serieko aleazio erabiliena da. Erresistentzia ona, pisu txikia eta korrosioarekiko propietate bikainak ditu. Hiru lodiera erabili dira: 0.35, 1.0 eta 1.5 mm.

Material konposatua osatzen duten bi materialez gain, itsasgarri bidezko loturen kasuan 3M™ Scotch-Weld™ Epoxy Adhesive EC-2216 B/A hautatu da. Tenperatura giroan ontzen den bi osagaiko epoxi malgua da, zurutzearekiko (peel) eta zizailadura-esfortzuekiko erresistentzia handia duena. Scotch-Weld EC-2216 itsasgarria aplikazio aeronautiko eta aeroespazialeterako probatua eta ziurtatua izan da.



3. irudia. FML fabrikazio prozesua

3. irudian ikus daitekeen bezala, fabrikazio-prozesurako, 135 °C-ko tenperaturan eta 90 minutuko denboran gauzatutako eraldaketa-ziklo bat definitu da labean. Gainera, konpaktazio handiagoa lortzeko, moldeak hutsa eta presioa aplikatzen ditu. Aluminioaren NaOH bidezko tratamendurako, 10 minutuko eraso-denbora zehaztu da. Tratamenduaren ondoren, plakak azetonarekin garbitu behar dira, baita karbono-zuntzarekin itsasgarriaren bidez lotuko diren plakak ere.

2.2. FML konpositeen fabrikazioa

Aluminioaren gainazal-tratamenduak abiatuta, atal honetan konpositearen eraldaketa-prozesuak garatu dira; hau da, bi FML mota fabrikatu dira: aluminioari NaOH bidezko tratamendua aplikatuta lortutakoa eta lotura itsasgarri fabrikatutakoa.

- NaOH bidez tratatutako aluminioa duen FMLa

NaOHaren %11ko (pisuz) disoluzioa prestatu da uretan, eta aluminiozko plakak bertan sartu dira 10 minutuz. Prozesuan zehar aluminioaren lodiera murriztu egin da, NaOHak eraso kimikoa eragiten baitio.



4. irudia. NaOH tratamenduaren ondorengo aluminiozko plakak.

Tratamendua amaitu ondoren, aluminiozko plakak azetonaz garbitu dira, geratu zitezkeen ezpurutasun txiki guztiak kentzeko. Plakak prestatuta zeudenean, 4. irudian ikusten den bezala, karbono-zuntzezko prepreg laminak moztu dira, aluminiozko plaken neurri berekin. Definitutako geruza-sekuentzia desberdinak prestatu dira, eta hutsean eta presiopean moldean sartu dira. Ondoren, moldea 135 °C-an 90 minutuz mantendu da, hozte geldo batekin, bi materialen artean tentsioak agertzeko aukera murrizteko.

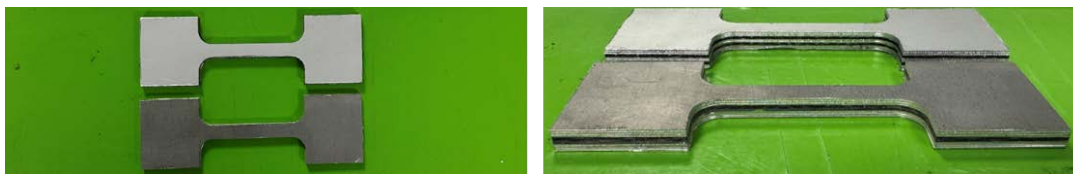
- 3M™ Scotch-Weld™ Epoxy Adhesive EC-2216 B/A itsasgarriarekin fabrikatutako FMLa

Aluminiozko plakak lehenik 1200 aleko lixa erabiliz lixatu dira; ondoren, azetonaz garbitu dira, eta laminatuak muntatu dira bi osagaiko itsasgarria kontaktu-azaleretan aplikatuz. Polimerizazio-prozesua aurreko FMLaren kasuan erabilitako bera izan da.



5. irudia. 5 geruzako FMLa polimerizazio-prozesua hasi aurretik (tratatu gabeko aluminioa).

Laginak lortu ondoren, piezak fresatu dira probetak egiteko, 6. irudian aurkezten den bezala. Fresaketa prozesu kritikoa da, FMLaren osotasuna arriskuan jar dezakeelako; horregatik, delaminazioak murrizteko bereziki egokitutako fresak erabili dira, hozte-sistemarekin eta aurrerapen-abiadura txikiarekin. Horrela, delaminazio-arriskua ahalik eta gehien murriztea lortu da. Fresaketa-prozesua material honetarako optimizatu da, eta, azkenik, lortutako probetek ez dute akatsik edo inperfekziorik aurkeztu.



6. irudia. Lortutako probetak (goian NaOH tratamendua, behean itsasgarria).

3.EMAITZAK

3.1 Trakzio saiakuntzen emaitzak

Bi aukeretarako (NaOH tratamendua eta itsasgarri bidezko lotura), 3 eta 5 geruzako konfigurazioak diseinatu dira, aluminio-lodiera hirurekin. Ondorengo 1. taulan laginen trakzio-saiakuntzetan lortutako emaitzarik esanguratsuenak aurkezten dira. FML konpositeen propietate mekanikoak, hala nola modulu elastikoa eta trakzio-erresistentzia, zehazteko, Autograph AG-X 100 kN (Shimadzu, Kyoto, Japonia) saiakuntza unibertsaleko makina erabili zen. Trakzio-saiakuntzetarako EN ISO 6892-1 arauaren arabera prestatu ziren 5 lagin saiakuntza bakoitzeko, eta haustura lortu arte kargatu ziren, 5 mm/min-ko desplazamendu-abiaduran.



7. irudia. FML trakzio saiakuntza

1. taula Laginen trakzio-saiakuntzetan lortutako trakzio erresistentzia eta modulu elastikoa

	Trakzio-erresistentzia (MPa)	Modulu elastikoa (GPa)
NaOH-5K-0,35mm	550±50	33.8±2.9
ADH-5K-0,35mm	248±27	17.0±1.3
NaOH-3K-1mm	276±23	37.2±3.7
ADH-3K-1mm	252±22	25.8±2.2
NaOH-5K-1,5mm	255±19	44.1±4.3
ADH-5K-1,5mm	232±20	27.0±2.1

Itsasgarriarekin fabrikatutako probetetan sakabanatze handiagoa antzeman da. Horren arrazoia material desberdinen gainean itsasgarria eskuz aplikatzea dela ondorioztatu da. Sakabanatze hori handiagoa da aluminioaren lodiera eta erabilitako geruza kopurua handitzen direnean. Aitzitik, NaOH bidezko tratamenduak homogeneotasun handiagoa ematen die laginei, eta hiru aluminio-lodierak erabiliz edozein geruza-sekuentzia fabrikatzeko aukera eskaintzen du. Era berean, taulan ikus daitekeenez, aluminioaren lodiera handitu ahala probeten trakzio-erresistentzia murriztu egiten da. Hau karbono-zuntzaren lodiera konstante mantendu delako gertatzen da; izan ere, probeta guztietan haustura

karbono-zuntzaren apurketaren ondorioz gertatu da. Hala ere, aluminio-lodiera txikiko probeten kasuan, sekzio osoak huts egiten du aldi berean.

Bestalde, modulu elastikoa handitu egiten da aluminioaren lodierarekin batera, probetak hausturan deformazio txikiagoa jasaten duelako. Itsasgarriaren erabilerak moldakortasun handiagoa eskaintzen du, aluminioan aurretiazko tratamendurik egin behar ez delako. Hala ere, fabrikatu beharreko geometriaren arabera, ezaugarri hori muga izan daiteke. Aldiz, NaOH bidez tratatutako aluminioak homogeneotasun handiagoa eta FMLaren prestazio mekaniko hobeak eskaintzen ditu.



8. irudia. FML lagina

3.2 Charpy inpaktu saiakuntzen emaitzak

Bi saiakuntza mota egin dira geruzen arteko atxikimendu-maila zehazteko eta emaitzak giro-tenperaturan ebaluatzeko; erabilitako erreferentziazko saiakuntza ZWICK RKP50 Charpy pendulu-saiakuntza izan da, giro-tenperaturan eginga. Charpy inpaktu-saiakuntzetan lortutako emaitzak 2. taulan aurkezten dira. 1,10 eta 1,97 mm arteko batez besteko lodiera zuten lau probeta-talde aztertu ziren. Inpaktuan xurgatutako energiak mendekotasun argia erakutsi zuen probeten lodierarekiko; izan ere, lodiera handiagoko probetetan nabarmen handiagoak izan ziren energiaren balioak.

2. taula. Charpy inpaktu-saiakuntzetan lortutako emaitzak

	Inpaktuan xurgatutako energia (J)	Laginaren batez besteko lodiera (mm)
NaOH-5K	2.0±0.3	1.97
ADH-5K	1.9±0.6	1.96
NaOH-3K	1.1±0.1	1.10
ADH-3K	1.3±0.3	1.15

NaOH 5 geruzako FML taldeko probetek (1,97 mm-ko batez besteko lodiera) erakutsi zuten xurgatutako energia handiena, 2.0 J-ko batez besteko balioarekin. Bestalde, NaOH 3 geruzako FML taldeak, 1.1 J-ko batez besteko energia xurgatu zuen. Xurgatutako energiaren murrizketa hori probeten sekzio erresistente txikiagoari egotz dakioke, eta horrek inpaktuaren energia xahutzeko duten gaitasuna mugatzen du. Haustura-moduaren analisiak erakutsi zuen probeta gehienetan ez zela haustura osoa gertatu. Horren ordez, laminatuaren geruzen arteko delaminazioa izan zen nagusi, geruzen arteko desitsastearen handitzean edo material konposatuaren eta aluminiozko xaflaren arteko interfazearen bereizketan agertuz. Jokabide horrek adierazten du inpaktuaren energia batez ere geruzen arteko kaltearen hedapenaren bidez dissipatu zela, eta ez laminatuaren hausturaren bidez.

Oro har, emaitzek erakusten dute aztertutako laminatu hibridoek inpaktuarekiko portaera nagusiki geruzen arteko loturaren erresistentziak baldintzatzen duela. Lodiera handiagoko probetek energia xurgatzeko gaitasun handiagoa erakusten duten arren, haustura-mekanismo nagusia delaminazioa izaten jarraitzen du, materialaren haustura osoa gertatu gabe. Jokabide horrek iradokitzen du konpositearen eta aluminioaren arteko interfazearen erresistentzia dela inpaktuaren aurrean sistemaren erantzuna mugatzen duen faktore nagusia; beraz, bi faseen arteko atxikimendua hobetzeak sistemaren zailtasuna eta inpaktuarekiko erresistentzia nabarmen handitu ahal izango lituzke.

4. ONDORIOAK

Lan honetan garatutako FML laminatu hibridoek erakutsi dute aluminioaren gainazal-tratamenduak eragin erabakigarria duela materialaren propietate mekanikoetan eta geruzen arteko atxikimenduan. Lortutako emaitzen arabera, NaOH bidez tratatutako aluminioarekin fabrikatutako laginek trakzio-erresistentzia eta zurruntasun handiagoak aurkeztu dituzte, baita emaitzen sakabanatze txikiagoa ere, itsasgarri bidez lotutako laginekin alderatuta. Horrek adierazten du tratamendu kimikoak interfaze homogeneoagoa eta karga-transferentzia eraginkorragoa sustatzen dituela konpositearen eta aluminioaren artean. Era berean, aluminioaren lodierak portaera mekanikoan eragin zuzena duela egiaztatu da: lodiera handitzean modulu elastikoa areagotzen da, baina trakzio-erresistentzia murriztu egiten da, haustura karbono-zuntzaren porrotak baldintzatzen duelako. Gainera, fabrikazio-prozesua arrakastaz optimizatu da, hutsa eta presioa erabiliz ontze-ziklo kontrolatu baten bidez kalitate handiko laminatuak lortuz eta mekanizazioan delaminazioak minimizatuz.

Ondorioz, etorkizuneko garapenek gainazal-tratamendu aurreratueta eta interfaze-konfigurazio berrietan jarri beharko da arreta, delaminazioarekiko erresistentzia handitzeko eta espazio-sektoreko aplikazioetarako behar diren propietate mekanikoak hobetzeko. Emaiza hauek erakusten dute NaOH bidezko tratamendua estrategia eraginkorra dela FMLen errendimendua hobetzeko, eta ikerketa-ildo sendoa eskaintzen dutela ingurune espazialean erabiliko diren egitura hibrido arinen garapenerako. Hala ere, ondorio horiek modu sendoagoan baieztatzeko beharrezkoa da etorkizunean analisi estatistiko zabalagoa egitea, errepikapen-kopurua eta emaitzen desbideratze estandarra barne hartuz. Era berean, lan honetan lortutako emaitzak giro-tenperaturan eta laborategiko baldintzetan egindako saiakuntzetan oinarritzen dira; beraz, materialek espazio-aplikazioetarako duten benetako egokitasuna baieztatzeko, ezinbestekoa da etorkizunean ingurune espazialeko baldintzak (hutsa, erradiazio ionizatzaila, ziklo termikoak eta outgassing fenomenoak) simulatzen dituzten saiakuntzak burutzea.

ESKER ONAK

Ikerketa hau Eusko Jaurlaritzako Ekonomiaren Garapen, Jasangarritasun eta Ingurumen Sailak finantzatu du, KK-2021/00061, KK-2023/00077 eta KK-2025/00106 dirulaguntzen bidez, hurrenez hurren HIPERION I, II eta III proiektuen barruan (Elkartek programa).

5. BIBLIOGRAFIA

[1] ASUNDI, A. eta CHOI, A.Y.N. 1997. «Fiber metal laminates: An advanced material for future aircraft». *Journal of Materials Processing Technology*, 63, 384–394.

[2] SINMAZÇELİK, T., AVCU, E., BORA, M.Ö. eta ÇOBAN, O. 2011. «A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods». *Materials & Design*, 32, 3671–3685.

[3] EL ETRI, H., KORKMAZ, M.E., GUPTA, M.K., GUNAY, M. eta XU, J. 2022. «A state-of-the-art review on mechanical characteristics of different fiber metal laminates for aerospace and structural applications». *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 123, 2965–2991.

[4] COSTA, R.D.F.S., SALES-CONTINI, R.C.M., SILVA, F.J.G., SEBBE, N. eta JESUS, A.M.P. 2023. «A Critical Review on Fiber Metal Laminates (FML): From Manufacturing to Sustainable Processing». *Metals*, 13, 638.

[5] VOGELLESANG, L.B. eta VLOT, A. 2000. «Development of fibre metal laminates for advanced aerospace structures». *Journal of Materials Processing Technology*, 103, 1–5.

[6] JENARTHANAN, M.P., KARTHIKEYAN, M. eta NEELI, N. 2017. «Mathematical modeling of delamination factor on drilling of ARALL composites through RSM». *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 13, 578–589.

[7] WU, G. eta YANG, J.M. 2005. «The mechanical behavior of GLARE laminates for aircraft structures». *JOM*, 57, 72–79.

[8] BOTELHO, E.C., SILVA, R.A., PARDINI, L.C. eta REZENDE, M.C. 2006. «A review on the development and properties of continuous fiber/epoxy/aluminum hybrid composites for aircraft structures». *Materials Research*, 9, 247–256.

[9] THOMAS, J. 2001. «The A380 programme – the big task for Europe’s aerospace industry». *Air & Space Europe*, 3, 35–39.

[10] ALDERLIESTEN, R.C. eta BENEDICTUS, R. 2008. «Fiber/Metal Composite Technology for Future Primary Aircraft Structures». *Journal of Aircraft*, 45, 1182–1189.

[11] YU, G.C., WU, L.Z., MA, L. eta XIONG, J. 2015. «Low velocity impact of carbon fiber aluminum laminates». *Composite Structures*, 119, 757–766.

[12] PATIL, N.A., MULIK, S.S., WANGIKAR, K.S. eta KULKARNI, A.P. 2018. «Characterization of glass laminate aluminium reinforced epoxy–A review». *Procedia Manufacturing*, 20, 554–562.

[13] SAMUEL, R. et al. 2021. «Studies on mechanical properties and characterization of carbon fiber reinforced hybrid composite for aerospace application». *Materials Today: Proceedings*, 47, 4438–4443.

[14] WILK, M. eta SLIWA, R.E. 2015. «The Influence of Features of Aluminium Alloys 2024, 6061 and 7075 on the Properties of Glare-Type Composites». *Metallurgy and Materials*, 60, 3101–3108.

[15] JOHNSON, W.S., LI, E. eta MILLER, J.L. 1996. «High temperature hybrid titanium composite laminates: An early analytical assessment». *Applied Composite Materials*, 3, 379–390.

- [16] ZHANG, X. et al. 2018. «Effects of surface treatments and bonding types on the interfacial behavior of fiber metal laminate based on magnesium alloy». *Applied Surface Science*, 427, 897–906.
- [17] DING, Z., WANG, H., LUO, J. eta LI, N. 2021. «A review on forming technologies of fibre metal laminates». *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 4, 110–126.
- [18] BANK, W. eta WISNOM, M.R. 2009. «Manufacturing principles of fiber metal laminates». *ICCM-17 Proceedings*.
- [19] OCHOA-PUTMAN, C. eta VAIDYA, U.K. 2011. «Mechanisms of interfacial adhesion in metal–polymer composites». *Composites Part A*, 42, 906–915.
- [20] HARRIS, A.F. eta BEEVERS, A. 1999. «The effects of grit-blasting on surface properties for adhesion». *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 19, 445–452.
- [21] MOLITOR, P., BARRON, V. eta YOUNG, T. 2001. «Surface treatment of titanium for adhesive bonding to polymer composites». *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 21, 129–136.
- [22] KONG, D. et al. 2022. «Enhanced bonding strength of AZ31B/carbon-fiber-reinforced plastic laminates by anodization treatment». *Materials Science and Engineering A*, 840, 142982.
- [23] ANDARABI, A.A., SHELESH-NEZHAD, K. eta CHAKHERLOU, T.N. 2023. «The effect of laser-texturing configurations on the interfacial resistance of carbon reinforced aluminium laminate». *Composite Interfaces*, 30, 103–122.
- [24] ALDERLIESTEN, R.C. eta HOMAN, J.J. 2006. «Fatigue and damage tolerance issues of Glare in aircraft structures». *International Journal of Fatigue*, 28, 1116–1123.
- [25] BORGONJE, B. eta YPMA, M.S. 2003. «Long Term Behaviour of Glare». *Applied Composite Materials*, 10, 243–255