

Altzairu mikroaleatuen konformaziorako bide berriak: totxo meheen isurketa jarraitua eta zuzeneko ijezketa

P. Uranga, A.I. Fernández, B. López, eta J.M. Rodríguez-Ibabe

CEIT eta Tecnun,
M. Lardizabal Pasealekua 15, 20018 DONOSTIA
Posta elektronikoa: puranga@ceit.es

Laburpena: Artikulu honetan altzairu-ekoizpenaren kostuak murrizteko garatzen ari diren teknologia berriak aztertuko dira; batez ere altzairuzko ekoizkin erdilanduen isurketa-prozesua ijezketa prozesuarekin zuzenean elkartzea (Zuzeneko Ijezketa) oinarri duten teknologiak izango ditugu hizpide. Metalurgiaren ikuspegitik, teknika berrien eta ohikoen artean badaude desberdintasun nabarmenak, hala nola ijezketaren aurreko alamtaina handiagoa eta osoko deformazio erabilgarri txikiagoa.

1. SARRERA

Erdi Aroan urez mugitutako burdinolak haizez mugitutakoei gailendu bazitzaizkien ere, kostuen murrizketara eta prozesu industrialen optimizaziora bideratutako teknologia berriak, altzairuaren industria-ekoizpen ohikoei gailendu zaizkie.

XX. mendeko azken hamarkadetako krisiak, planetetako ezaugarri zurruneekin batera, Labe Garaien kasuan gertatu zen moduan, askoz txikiagoak baina aldi berean, eraginkor eta produktiboagoak diren altzairutegiak sortzea eragin zuen. Horrela, Isurketa Jarraitua eta Totxo Meheen Ijezketa Zuzena bezalako teknologia berriek bere tokia lortu zuten industriaren birmoldaketan.

Teknologia honen abantailak hauek dira: Lehenik, aukera ematen du isurketa jarraitua eta bero-ijezketa prozesu bakarrean elkartzeko. Bigarrenik, joera azaltzen du ohiko prozesamendu bidearen ordez Labe Elektriakoan urtutako txatarra eta burdina harrotik abiatuta altzairuzko ekoizkin lauak lortzeko. Energia-kontsumoaren aurrezpen handiaz gain, produktibi-

tatea 30000 Tonara igotzen da gizoneko eta urteko. Bobina bat hiru orduan ekoiztea ahalbidetzen du, aurreko teknologiak behar zuen aste eta erdiaren ordean.

Baina dena ez dira abantailak. Mikroaleatu gabeko altzairuetan ohiko prozesuekin lortutakoen antzeko ezaugarri mekanikoak lortzen badira ere, mikroaleatutako altzairuetan eta bukaerako lodiera handiko xafletzat bereziki, zailtasun ugari daude oraindik ezaugarri-eskakizun horiek betetzeko.

Prozesu hauek berezkoak dituzten ezaugarriek, isurketatik datorren hasierako egiturak eta gertaturiko osoko deformazio murrizketa handiak, aldaketa sakonak eragiten ditu ezaugarri-mekaniko egoki eta errepikakorrak ziurtatzeko beharrezkoak diren azken mikroegiturak lortzeko orduan.

Lan honetan altzairu mikroaleatuen bilakaerari jarraiki eta altzairuaren konformazioari loturik gertatzen diren aldaketa sakonak aurkezten dira, aldaketa industrial eta teknologikoak altzairuaren barne egituran sortzen dituen desberdintasunei arreta berezia eskainiaz.

2. ALTZAIRU MIKROALEATUAK: IKUSPEGI HISTORIKOA

Elementu desberdinak kantitate txikitik gehitzea, hau da, elementu mikroaleatzaileen erabilera, altzairugileak altzairuaren propietatea hobetu eta aplikazio bakoitzarentzat ekoizkin onena lortzeko duen mekanismo garrantzitsuenetako bat bilakatu da. Elementurik erabilienean artean Al, Nb, Ti, V eta B-a aipa daitezke. Mota honetako aleazio-elementuen kantitatea ez da % 0.1 baino handiagoa izaten. Hala ere, altzairu hauen elastikotasun-muga C-Mn altzairu batena baino bi edo hiru aldiz handiagoa izan ohi da [1].

Aipatutako elementu hauen gehitze txikiek altzairuaren mikroegitura aldatzen dute eta ondorioz, baita propietate mekanikoak ere. Eragin aipagarri guztien artean garrantzitsuena ale-tamainaren fintzea da. Elementu mikroaleatzaileen gehitzeak austenita ale-tamainaren kontrola ahalbidetzen du altzairuaren beroko konformazioan zehar. Era horretara, austenita-aleen fintzeak ferrita ale-tamaina finago bat dakar berarekin transformazioaren ondoren. Emaitza, altzairuaren jasankortasunaren eta zailtasunaren hobetze bat da.

Beste eragin nabari bat hauspeatzeak eragindako gogortzea litzateke. Ohiko bero-konformazio prozesuetan, deformazioa gertatu aurretik altzairuari bero-tratamendu bat ematen zaio eta tratamendu horretan zehar ele-

mentu mikroaleatzaileen disoluzioa gertatzen da. Tratamendu termomekaniko egoki batek hauspeakin finak sor ditzake, ferritaren gogortze bat lor dezaketenak. Hauspeakin hauek, askotan nitruro egonkorak dira eta hauspeatzeak altzairuaren nitrogeno askea gutxitzen du.

Elementu mikroaleatzaileek, materialean tenperatura altuetan gertatzen diren biguntze prozesuetan ere eragin aipagarria dute. Adibidez, birkristaltzean (hau da, deformazioaren eraginez gertatzen den ale berrien kristalizazioan) izan dezaketen eragina bi motatakoa izan daiteke: elementuek soluzio solidoan duten eragina alde batetik, eta bestetik karburo-, nitruro- edota karbonitruro-hauspeakinek birkristaltzean duten atzerapen eragina. Azken kasu honetan, birkristaltzea zeharo oztopatzera irits daitezke.

Altzairuen mikroaleazioak, bi piezen elkarketan ere badu eraginik, eta adibidez, soldaduran beroak eragindako zonaren propietateak erabat alda ditzake. Ti bezalako zenbait elementu mikroaleatzaile gehitzeak, beroak eragindako zonan ale-tamaina kontrolatzea ahalbidetzen du. Horrela eremu horietako ezaugarri mekanikoak hobetzen dira.

Niobioa 40.eko hamarkadan hasi zen elementu mikroaleatzaile bezala erabiltzen, baina industriako aplikazioetan ez zen erabili 60.eko hamarkadaren amaiera arte, V edo Ti-arekin batera. Altzairu hauen erabilera bultzatu zuten faktoreak ondorengoak izan ziren [1]:

- Eraikuntza-materialetakoko kostuetan sekzioen murrizketaren ondorioz eta altzairu mikroaleatuen erresistentzia handiagoi esker lortzen diren aurrezpenak.
- Eskaintza handiagoak dituzten ibilgailu arinagoen garapena.
- Oliobideak egiteko erresistentzia handikoa eta erraz soldatzekoa den altzairu-gama berri baten beharra, diametro handiagoak lortu eta presio handiagoekin lan egiteko.
- Elkartze prozesurik erabiliena soldadura da eta altzairu mikroaleatuak (gehienetan karbono baxukoak) arazorik gabe solda daitezke ohiko soldadura-metodoekin.
- Jasankortasun nahikoa modu ekonomiko batean igo daiteke niobio edota banadioa altzairu erdibaretuei gehituaz.
- Altzairutegi handientzat sorturiko ekipo tekniko garrantzitsuak eta ikerketa zentroak, bai ekoizpen eta baita erabilera-arazoei ere erantzuna emateko sortuak.

70. hamarkadaren hasieran altzairu berarekin erresistentzia-tarte handi bat lor zitekeen, bero-ijejketan zehar izandako baldintzen arabera (*Ijejketa-Kontrolatua*). Ijejketa-trenak, bukaerako ijejketa trenaren eta bobinaketa zonaren arteko hozketa-sistemez hornitu ziren eta metalurgiako tresan erabilgarri bilakatu ziren.

80.eko hamarkadaren erdialdean, mikroaleazio-teknologia karbono gehiagoko altzairuetara hedatzen hasi zen. Banadioa karbono ertain eta altuetako forjaketa-altzairuentzat erabiltzen zen. Horrela, erresistentzia maila berdinak lortzen ziren, nahiz airean hoztutako produktuetan nahiz ohiko tenplaketa/iraoketa prozesuentzat, ondorioz gertatzen den produkzio-kostuen murrizketa lortzen zen. Garai horretan «Titanio Nitruoaren Teknologia» deitutakoa ere garatzen hasi zen. 60.eko hamarkadaren amaieratik ezagutzen zen titanioak ale-hazkundera oztopatzen zuela, baina ez zen oso teknika erabilia gehitutako kantitateak eta honen ondorioak kontrolatzeko zeuden zailtasunak zirela eta. Titanio nitruoaren teknologia soldadurarako ere oso erabilia izan da, hauspeatze mota hau oso eraginkorra delako beroak eragindako zonan ale-hazkundera eragozteko. 80. hamarkadaren erdialdera, beste aplikazio bat sortu zen altzairu mikroaleatuentzat: erresistentzia handiagoko eta hotzean ijetzitako eta suberaturako xafla lodien konformazioa hobetzea helburu zutenak.

Altzairu mikroaleatuen garapena, merkatuaren eskaerei lotua dago. Atal honetan altzairu-ekoizpen prozesuetan gertatutako aldaketak aipatu dira, gehienetan fabrikazio-kostuei lotuak eta baita produktuaren kalitatea hobetzeko saiakuntzei lotuak ere. 2. Atalean, altzairua industrian ekoizteko dauden hainbat teknika azalduko dira.

Ekoizpen-teknologietan azken urteotan aurrerapauso garrantzitsuak eman dira eta kostuak nabarmenki jaitsiaz, kalitate bereko ekoizkinak eginda ere. Horien artean, Isurketa eta Ijezketa prozesu batean biltzen dituzten teknologia berriak daude. Hurrengo atalean berezitasunak argituko diren arren, esan dezakegu, gaur egun, Totxo Meheen Isurketa eta Zuzeneko Ijezketa Teknologiarene bidez egindako altzairua oso zabaldua dagoela, hazkundera plangintza handiekin [2]. Dena den, nahiz eta orain dela gutxi prozesaketa-bide horren bitartez eginiko materialei buruzko hauspeatze eta ezaugarri mekanikoen azterketak argitaratu [3], ez da erduztapenari eta eraginkorrek diren mekanismoei buruzko lan sakonik agertu [4]. Honen guztiaren ondorioz, ordenagailuan eginiko simulazioen bitartez iragarpen zuzenak egin ahal izateko, beharrezkoa da teknologia honen ezaugarriak kontuan hartzen dituen erduztapenaren azterketa sakon bat egitea.

3. ALTZAIRUA KONFORMATZEKO PROZESUAK. OHIKO IJEZKETA ETA TMI + ZI PROZESU BERRIA

Atal honetan altzairuaren hainbat industria-prozesamendu aztertuko dira: ohiko bideak, teknologia berriak, bero-kargako teknikak,... Azkenik, materiala prozesatzeko hainbat bideren laborategiko simulazioa ere aztertuko da.

1. Irudian bobinatutako xafla prozesatzeko bideen eskemak agertzen dira:

- Ohiko Bidea OB:** Totxo lodia isurketa jarraituan oinarritzen da. Totxoaren lodiera 250 mm-koa izan ohi da gutxi gorabehera. Isurketaren ondoren airean hozten utzi eta biltegian gordetzen da. Ondoren, totxoa $\approx 1200-1250^{\circ}\text{C}$ -ra 2 edo 3 orduz labe batean berotu eta arbastu eta bukaerako trenez osaturiko ijezketa prozesura igarotzen da. Azkenik, lorturiko xafla bobinatu egiten da.
- Totxo Meheen Isurketa Jarraitua eta Zuzeneko Ijezketa TMI + ZI:** Prozesamendu bide berri bat da. Bertan 50 mm inguruko totxo mehearen isurketa jarraituaren (*TMI*) ondoren, zuzeneko ijezketa (*ZI*) egiten da, aurretik 12-20 minutuan homogenizazio labe batetik igaro ondoren. Laminazio-trena laburragoa da, 6-7 kaxakoa soilik eta hemen ere bobinatu egiten da lortutako xafla. Prozesaketa-bide hau «Altzairutegi Trinkoa» edota «Thin Slab Casting and Direct Rolling» bezala ere ezagutzen da.

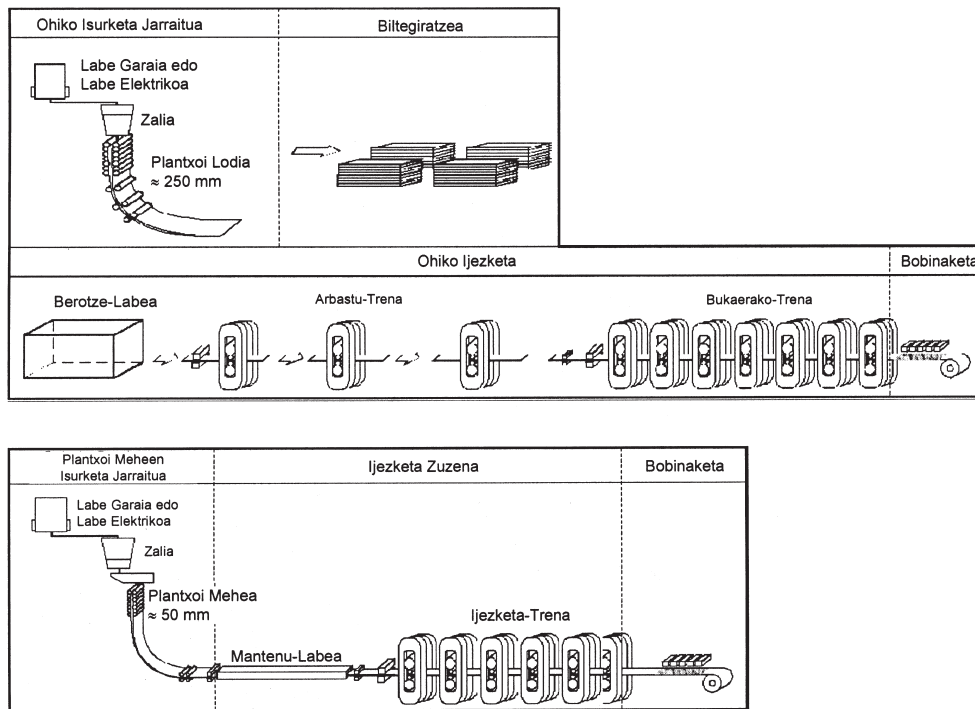
TMI + ZI prozesamendu bidearen lehen urratsak ohiko totxo lodien Beroko Kargarekin eman ziren, «Hot Charge Rolling» *HCR* delakoarekin, isurketa jarraitutik zetorren beroaren zati bat aprobetxatu nahirik.

Gaur egun, altzairua *TMI + ZI* bidez konformatzea errealitate bat da, eta etorkizun hurbil batean produktu lauen %70a honela ekoitziko dela uste da. Prozesamendu bide berri honen garrantzi eta garapenaren arrazoiak ekonomikoak dira [5-7]:

- Inbertsio eta funtzionamendu-kostu baxuak. Energia-kontsumoa %40an murrizten da, 1/4 beroketari eta 3/4 erredukzio baxuagoari dagokiolarik. Instalazio txikiago eta isurketa ijezketari zuzenean lotua egoteagatik eskulan-kostuak ere nabarmen gutxitzen dira.
- Isurketa jarraitua bero-konformazioari zuzenean lotzeak, txatarretatik bobinatutako xafla lortzeko behar den denbora asko laburtzen du, 3 orduraino jaits daitekeelarik.
- Txatarra-birziklapena labe elektrikoekin eginiko altzairuetan.

Ohiko bideetatik prozesaturiko xaflek baino gainazal-kalitate txarragoa lortzea dugu hemen desabantaila nagusia. Beraz, ezaugarri altuetako zenbait piezarentzat ez da teknologia egokia baina bai beste zenbait helbururentzat: silo edo edukiontzientzat, industriako nabeentzat eta tutu soldatuentzat besteak beste.

Ondoren, xafla bobinatuaren fabrikazio prozesuaren etapa desberdinak azalduko dira, isurketa eta ijezketa bilduaz eta *OB* eta *TMI + ZI* prozesamendu bideen arteko desberdintasun nagusiak azpimarratuz (1. Irudia) 1. Taulan eskematikoki laburtzen dira berauek.



1. **irudia.** Xafla bobinatua lortzeko industrian erabiltzen diren prozesamendu bi-deak (OB eta TMI+ZI).

3.1. Isurketa Jarraitua

Isurketa jarraituaren prozesuan, zuzenean urez hoztutako kobrezko molde batera isurtzen da altzairu likidoa. Molde horren irteeran ekoizkinak sekzio egokia izango du: totxo lodia Ohiko Ijezketaren kasuan (≈ 250 mm) eta totxo mehea Totxo Meheen Isurketan (≈ 50 mm). Isurketa jarraituaren teknologia, lauak ez diren ekoizkintan ere aplikatzen da, totxo karratuan edota erdilantutako beste hainbat ekoizkintan: eraikuntzarako habeak egiteko «beam blank» edo hezur eiteko sekzioetan, eta bai «strip casting» delakoan ere, hau da, xafla meheen isurketa jarraituan [5]. Isurketa jarraituaren bidez altzairua lortzeko teknologiak alde handia dauka, lingotontzian likidoa isuri, hoztu eta ondoren bere konformaziorako berotzen duen teknologiarekin.

Ohiko isurketa jarraituak 60.eko hamarkadaren hasieran izan zuen bere garapena. Totxo Meheen Isurketak aldiz 90.eko hamarkadaren hasieran [5]. Gaur egun, mendebaldeko herrialdeen altzairu-ekoizpenaren %85a isurketa jarraituaren bidez lortzen da. Beste herrialdeetan, ikerketarako diruaren eskasiak atzeratu egin du teknologia honen hasiera, baina dena den, lingotean eginiko isurketak ez du etorkizun handirik. Bestalde, eta lehen esan den

moduan, *TMI + ZI* teknologia etorkizun hurbil batean ekoizkin lauen %70 ekoizteko gai izango dela uste da.

Isurketa jarraituak ohiko isurketaren aurrean duen abantailarik nabarmenenak, azken sekzioa lortzeko eman behar zaion osoko deformazioaren ondorioz lortzen diren energia- eta diru arrezpenak dira. Ekoizkin erdilandu edo totxo meheen isurketan nabariagoa da efektu hau, kasu hauetan ia zeharo ekiditen baita ohiko prozesuetan lehenengo konformazio-etapa den hasierako arbastua. I. Taulan, azpimarra daiteke 5 mm-ko azken lodiera lortzeko, ijezketa-sekuentzia osoan zehar totxo lodiarri (≈ 250 mm) ematen zaion osoko deformazioaren baliokidea (4.52), totxo meheari ematen zaionaren ia bikoitza dela (2.66).

Isurketa jarraituaren erabilerak baditu hainbat eskakizun, batez ere eragozpen batuzk gainditzeko unean: konposizioaren aldaketak, isurbide estali eta murgilduaren buxadura eta bero-harikortasun ezagatik gertatzem den totxoaren kurbatzea eta zuzenketan agertzen diren pitzadurak. Azken arazo hau lehenik aluminioz baretutako altzairuetan agertu zen eta ondoren niobioz trataturikoetan [7,8].

Altzairuaren isurketa jarraituaren ondoren hainbat prozesamendu-aukera daude:

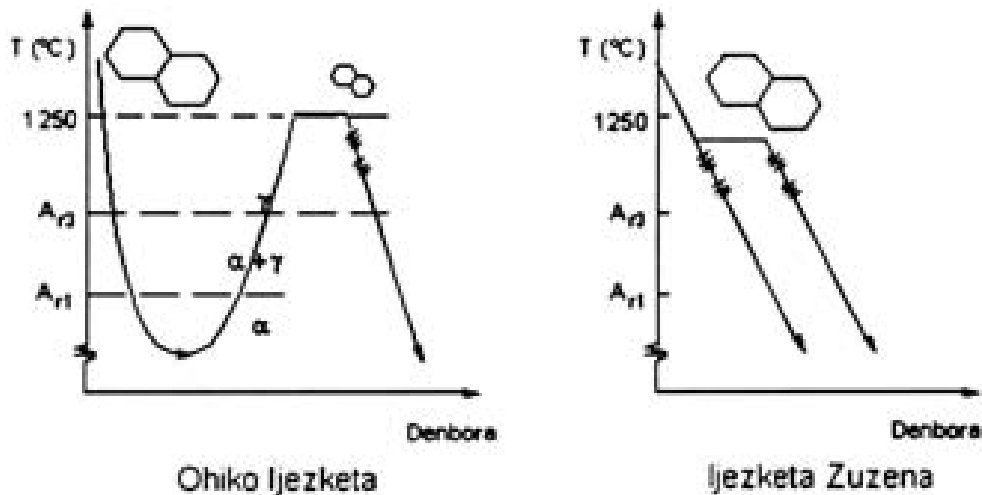
- Materiala giro-tenperaturaraino hozten utzi, biltegitatu eta bere konformaziorako berriz berotu: Ohiko Bidea, *OB*.
- Materiala zuzenean sar daiteke konformazio-prozesuan, isurketa gertatu ondoren beroko ijezketa trenetan. Bi aukera daude: Lehenbizikoa Bero Karga (Hot Charging), bertan altzairua eremu ferritikoraino hozten da ($600-700^{\circ}\text{C}$) eta ondoren labe batean sartzen da zeharo hozteko denborarik utzi gabe. Bigarren aukera, Zuzeneko Beroko Ijezketa da (*ZI*); kasu honetan $1100-1150^{\circ}\text{C}$ -tara homogenizazio tratamendu bat eman dakioke altzairuari. Prozesu hauetan isurketatik datorren materialaren beroari askoz ere etekin handiagoa atera dakioke.

Bero-konformazio prozesamendua egin aurretik dagoen mikroegitura, isurketa prozesuaren eta materialak solidotzetik deformazioa hasteko uneraino izan duen historia termikoaren menpekoa da. Zuzeneko Ijezketa egin aurreko mikroegituran desberdintasun nabariak daude ohiko prozesuekin alderatuz gero. Hurrengo hauek dira nagusiak, hurrengo ataletan banan-banan aztertuko ditugunak: austenitaren ale-tamaina, hauspeatzea (elementuak soluzio solidoan) eta segregazioak.

Austenitaren Ale-Tamaina

Altzairua, isurketa jarraituaren ondoren giro-tenperaturaraino hozten denean, hozketan zehar eta ondorengo austenizazioan zehar bi transformazio

gertatzen dira: lehenengoa austenita-ferrita ($\gamma \rightarrow \alpha$) eta bigarrena ferrita-austenita ($\alpha \rightarrow \gamma$). Fase-transformazio hauei esker, ohiko ijezketa-prozesuen hasierako austenitaren ale-tamaina askoz txikiago izaten da, totxo meheen ijezketa zuzenaren aurretik izaten dena baino. Ohiko prozesamenduaren baldintzetan, hasierako batezbesteko ale-tamaina deformazio aurretik gertaturiko bero-tratamenduaren ($T_{berok} \leq 1250^\circ\text{C}$) eta materialean dauden hauspeakinen menpekkoa da eta 80-250 μm tartekoa. Ale-tamaina txikiak niobioz edota titanioz mikroaleatutako altzairuetan lortzen dira, elementu hauek ale-hazkunderari jar-tzen dioten oztopoengatik. Bestalde, ijezketa zuzenari loturiko prozesuetan, deformatzen den austenita solidotze prozesutik dator (2. Irudia), hasierako ale-tamaina ohiko prozesutakoa baino askoz handiagoa izanik, 600-1400 μm artekoa [6,9]. Beraz bi prozesamendu bide hauen arteko hasierako ale-tamainaren desberdintasunak magnitude ordena batekoak izan daitezke.



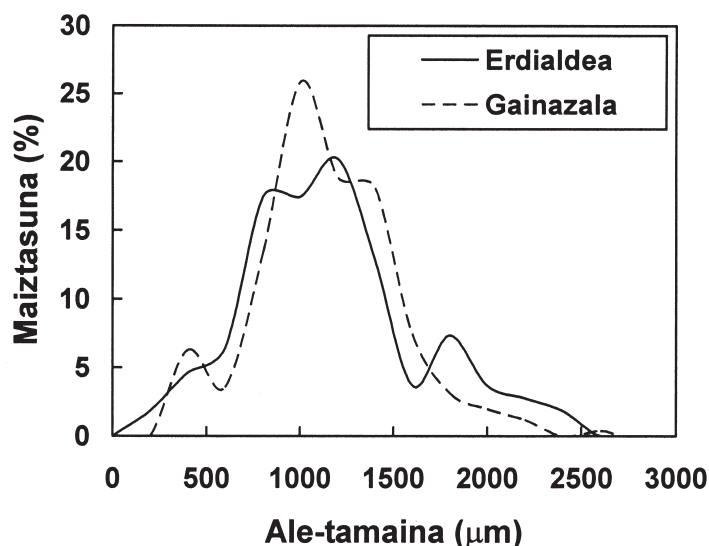
2. irudia. OB eta TMI +ZI industria-prozesamenduetan gertatzen den austenita-aleen tamainaren bilakaera.

Likidoaren isurketa-tenperatura eta hozte-abiadurek zuzendutako solidifikazio-prozesuaren emaitza bezala lortzen da totxoaren mikroegitura austenitikoa. Hoztean zehar dauden gradientek hainbat egitura eragiten dituzte totxoaren lodieran. Solidifikazioan jatorria duten ale-handien egiturek itxura desberdina hartzen dute. Gainazaletik gertu forma ekiaxikoa izan ohi dute; gainazala eta totxoaren erdialdearen artean dagoen gunean aldiz, ale ekiaxikoen eta ardatza gainazalari elkarzut duten zutabe-egiturako aleen arteko konbinazio bat. Normalean azken gune honetan gainazalaren inguruan baino ale handiagoak aurkitu ohi dira. Bibliografian argitaraturiko batezbesteko ale-tamainen antzerakoak behatu arren, 800-1000 μm ingurukoak,

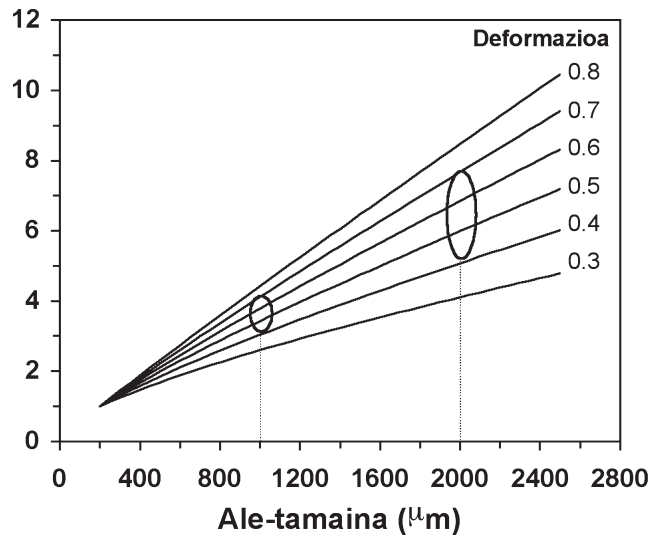
alerik handienek 2000 μm inguruko tamaina lor dezakete, eta horrek erabat aldatzen du kontua.

Beraz, ezinbesteko garrantzia du hasierako austenita-aleen tamaina-banaketa ezagutzeak. Biguntze-mekanismoen aktibazioa, aleen birkristaltzearekin eta ondorioz fintzearekin loturik dagoelarik, ale-tamainak baldintzatzen du. Hortaz, hasierako ale-tamainaren heterogenotasunak, birkristaldu eta birkristaldu gabeko totxo beraren zonen arteko desberdintasun handiak eragin litzake, eta baliteke honek mikroegitura-fintze desberdinak ekartzea.

3. Irudiak industriako totxo mehe bateko lagin baten bi zonetan neurtutako austenita-aleen tamainen banaketak aurkezten ditu [10]. Gainazaletik gertuen dagoen zonak egitura ekiaxikoa erakusten du eta besteak aldiz, totxoaren erdialdetik gertu dagoelarik, tamaina handiagoko ale ekiaxikoa eta luzatuen egitura misto bat. Irudian ikusita, totxoaren erdialdean 2 mm inguruko ale-tamainako frakzio bolumetrikoko larri bat dagoela ondoriozta daiteke. Hona hemen Altzairutegi Trinko (CSP Compact Strip Production) baten ijezketa-sekuentzia bati dagozkion baldintza batzuk: Lehenengo deformazio-kaxaren sarrera-tenperatura 1040°C-1100°C artekoa da eta 0.6 eta 1 tarteko deformazioa eta 5 s⁻¹-eko deformazio-abiadura ditu lehenengo deformazio-iraganaldian; bestetik, hasierako batez besteko ale-tamaina 800-1000 μm tartekoa dela kontuan hartuz, kontuan hartuz, Fernández eta kol.[11] -ek lortutako ekuazioa ezartzen bazaie, lehen eta bigarren kaxen arteko iraganaldi arteko denboran birkristaltze osoa gertatuko litzatekeela aurrezaten da. Baina bestalde, hasierako ale-tamaina 2000-2500 μm -raino irits daiteke.



3. irudia. Industriako totxo mehe baten lagin batean neurturiko austenita-aleen tamainen banaketa [10].



4. irudia. Hasierako ale-tamainaren eta deformazioaren eragina birkristaltze-denboran, azken hau t_{200} balioarekin (hasierako 200 μm -ko ale tamainari dagokion birkristaltze denborarekin) normalizatua.

Birkristaltze estatikoaren zinetikak nabarmenki alda daitezkeela esan da hasierako ale-tamaina dela eta. Desberdintasun hauek, ohiko ijezketako ale-tamaina (200-300 μm) eta zuzeneko kargakoaren (1000-2000 μm) arteko desberdintasunei begiratuaz, pentsa liteke birkristaltze zinetikak zeharo alda daitezkeela. 4. Irudian hasierako austenita-aleen tamaina desberdinentzat eta hasierako 200 μm -ko tamaina bati dagokion denboraren (t_{200}) artean zatitu den birkristaltze-denbora versus deformazio desberdinei dagokion austenita ale-tamaina irudikatu da. Horretarako aurretik aipatutako ekuazioa erabili da, berau niobioz edota titanioz mikroaleaturiko altzairu batentzat eta hasierako ale-tamaina tarte zabal batentzat lortu delarik. 0.4 eta 0.7 arteko deformazioentzat, CSP planta bateko lehen kaxaren ohiko-balio bezala, hasierako ale-tamaina 200 μm -tik 1 mm-ra aldatuz gero, birkristaltze denbora 3 eta 4 aldiz hazten da hurrenez-hurren. 2 mm-ko ale batentzat berriz, denbora bikoiztuko litzateke.

Mikroegituraren heterogenotasunek, hasierako solidotze-egituraren fin-tzean eragin erabakigarria dutela, kalkulu hauen ondorioz garrantzitsuena da. Osoko fintze bat lortu gabe ijezketaren azken kutxatetara iritsiz gero, azken ekoizkinean mikroegituraren heterogenotasun nabarmenek, materialaren ezaugarri mekaniko onartezinak eragin ditzateke [10].

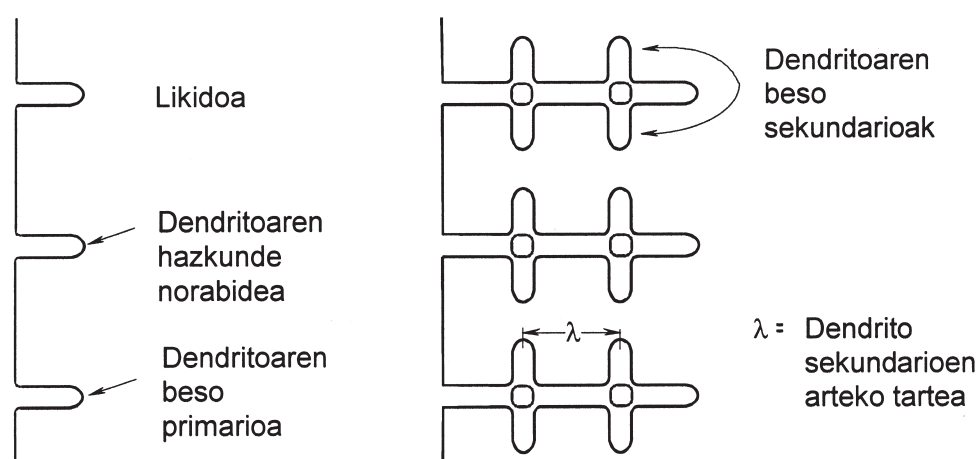
Hauspeatzea (soluzio solidoan dauden elementuak)

Hauspeatzea da isurketaren ondoren zuzenean ijeztako material baten eta ijezketaren aurretik giro-tenperaturatik berotutako material baten arteko

beste desberdintasun bat. Solidotzetik datorren mikroegitura («as-cast» delakoan), batez ere hauen hauspeatze-zinetiken menpekota da mikroaleatzaileen kontzentrazioa. Gehienetan, austenitak gainasetze handiagoa izaten du kasu hauetan eta baldintza hauekin hauspeatzea gertatzeko indar bultzaizailea handiagoa da ohiko berotze-tratamenduen ondorengoa baino [9,12]. Azken hauetan, elementu mikroaleatzaileen kontzentrazioa, deformazio aurreko tratamendu-tenperaturan mantendu den denboraren menpekota da. Desberdintasun azpimarragarriena titanioz mikroaleatutako altzairuetan gertatzen da. TiN hauspeakin finak ez dira ohiko beroketa-tenperaturetan ($\leq 1250^{\circ}\text{C}$) disolbatzen eta beraz, ohiko ijezketa-sekuentzia osoan bertan egongo dira; ijezketa zuzeneko prozesuetan aldiz ez du horrela gertatu beharrik izango.

Segregazioak

Aleazio gehienak, eta berauen artean altzairuak, dendrito egiturekin solidotzen dira. 5. Irudian, dendrito bidezko solidotze prozesuaren eskema aurkezten da. Nukleo baten gain gertatzen den solidotzearen aurrerapena norabide kristalino jakin batzuetan gertatzen da eta dendrito izeneko-adarkadurak sortzen dira. Jatorrizko beso dendritikoak, metal puru bat bezala solidifikatzen dira, orokorrean inguruan duten likidoa solutueta aberastua geratuta [13]. Beraz, likido hau solidotzean izango duen solutu-kontzentrazioa altua izango da. C eta N elementu interstizialak izanik ez dira asko segregatzen, baina bai ordea Nb eta Ti bezalako atomoak, ordezkapen-posizioak dituztelako [13]. Hain zuzen ere, dendrito sekundarioen arteko tartek definitzen ditu segregazioen arteko distantziak, tarte hau solidotze-abiaduraren islada zuzena izanik.



5. irudia. Dendritoen bidezko hazkunde-eredua.

Lodiera meheagoaren ondorioz, totxo meheen isurketan izaten diren solidotze-abiadurak handiagoak izan ohi dira ohiko isurketa jarraituan baino. Beraz, segregazioen banaketek tarte txikiagoa izango dute lehenengoan. Dendrito sekundarioen tarteak, λ , 50-100 m artean izan ohi da totxo meheen isurketan eta 100-300 m tartean ohiko isurketa jarraituan [14].

Dena den, segregazioek homogenizazio bat izan ohi dute ohiko prozesamenduan gertatzen diren fase-transformazioen eraginez. Gainera, deformazioak eragin dezakeen homogenizazioa handiagoa da kasu horretan TMI + ZI prozesuetan baino. Izan ere, gertaturiko osoko deformazioa handiagoa da. Bi efektu hauek, segregazio tarteen arteko desberdintasunak oreka ditzake.

I. taula. OB eta TMI + ZI bide berriaren arteko alde nagusiak.

	OB	TMI + ZI
Totxoaren Hasierako Lodiera	~250 mm	~50 mm
Deformazio Aurreko Austenita-Aleen Tamaina	80 - 250 m ($T_{berok} \leq 1250^\circ\text{C}$)	600 - 1400 m [6,9] (isurketako egitura)
ϵ erabilgarri osoa (5 mm-ko azken lodierarentzat)	4.52 (*)	2.66 (*)
Iraganaldi bakoitzeko deformazioa	Altuak arbastuan	EZ
	Bukaeran txikiak gainazal-kalitate ona lortzeko	Handiak, ~2.5 aldiz handiagoak OB-ko bukaerako iraganaldietan baino [7]
Segregazioak	$\lambda = 100 - 300$ m [14]	$\lambda = 50 - 100$ m [14]
	—Homogenizazioa $\gamma \rightarrow \alpha$, $\alpha \rightarrow \gamma$ transformazioetan. —Deformazioaren eraginez lorturiko homogenizazioa.	—Deformazioari loturiko homogenizazio urriagoa.

(*) $\epsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{H_0}{H_f}$, non ϵ deformazio-baliokidea eta H_0 eta H_f totxoaren hasierako lodiera eta amaierako lodiera baitira.

3.2. Beroko Ijezketa

Tradizioz, bero-konformazioak materialaren forma eta aplikazio bakoitzarentzat edota bero-tratamenduentzat egokienak ziren ezaugarri mekanikoak ematea izan zuen helburu. Gaur egun ordea, konformazio prozesua gertatu eta gertatu ondoren bero-tratamenduak ematea kasu jakin batzuetan baizik ez da gertatzen ekoizkinaren garestitzea dela eta. Horrela, forma eman eta ezaugarri mekaniko egokiak batera ematea da bero-ijezketa helburu nagusia. Ideia hau oinarritzat hartuta «*Ijezketa Kontrolatua*» sortu zen.

Ferritaren ale-tamaina da txikiagotzean erresistentzia eta zailtasuna batera hobetzen dituen parametro bakarra. Beraz, ijezketaren ondoren zuzenean ferrita-egitura homogeno eta ale-tamaina fin bat lortzea da altzairu mikroaleatuen beroko ijezketaren helburu nagusia.

Ohiko bero-ijezketan, 1 eta 100 s⁻¹-eko tartean dauden deformazio-abiadurak erabili ohi dira, 0.2 eta 0.5 arteko deformazio-iraganaldi segidak eta 5 inguruko osoko deformazioak dituztenak.

1. Irudian ikus daitekeen moduan, ohiko bero-ijezketa bi ijezketa-trenez osatua dago: «arbastua» eta «bukaerakoa». Tren bakoitza, instalazio bakoitzaren arabera kaxa kopuru batez osatua dago. Badira halaber tren itzulgarriak ere, materiala bi norabideetan deformatzeko aukera ematen dutenak. Industria-ijezketetako iraganaldien arteko denborak, produktuaren eta ijezketa-tren motaren arabera dira: produktu lau eta tren itzulgarrietarako, iraganaldi arteko denborak 8 eta 20 s artean egon daitezke; bero-xaflarentzat berriz 0.4 eta 4 s artean [15].

Esana dago dagoeneko totxo meheen ijezketa zuzenak desberdintasun garrantzitsuak dituela. Hona hemen hainbat zehaztapen tenperatura, deformazio eta denborei buruz [6]:

- Ijezketaren sarrera-tenperaturak baxuagoak dira eta lehenengo iraganaldia gehienez 1060-1100°C artean gertatzen da.
- Osoko erredukzio txikiagoa, berau 5 edo 6 deformazio-iraganalditan gertatzen dena.
- Iraganaldi bakoitzeko deformazio handiagoak dira, gutxi gorabehera ohiko ijezketaren bukaerako trenean ematen direnak baino 2.5 aldiz handiagoak [16].
- Ohiko bukaerako trenetan baino deformazio-abiadura txikiagoak direnez, azkeneko iraganaldien arteko denborak luzeagoak izan ohi dira.

Ikus daitekeenez, ohiko ijezketa-prozesuekiko mikroegitura- eta deformazio-sekuentzien desberdintasunak asko eta garrantzizkoak dira. Hitz gutxitan, deformazioaren erdiarekin magnitude-ordena bateko aldea duten austenita-aleak findu behar dira (I. Taula). Lehen ondorio bezala, beharrez-

koa gertatzen da biguntze-mekanismoen eta birkristaltze-prozesuen kontrol finago bat, ahal den ferrita/perlita egitura finenak eta ezaugarri mekaniko egokienak lortzeko.

4. ONDORIOAK

Teknologia berri hauek industria mailan garatzeko arrazoi nagusiak ekonomikoak izan ziren arren, ezinbestekoa izan zen metalurgiaren ikuspegitik prozesu osoaren ikerketa sakon bat egitea.

Ohiko teknologiek lortutako esperientzia garrantzitsua izan arren, aurkeztu diren desberdintasunek, prozesuaren diseinuan deformazio, abiadura, denbora eta tenperaturen doitze berriak eragin dituzte. Bestalde, baldintza berri hauetara ongien egokitzen diren altzairuen konposizio berriak ere diseinatu behar izan dira.

Honekin batera, baldintza hauen arabera eraikitako eredu matematiko berrien agerpenek, industriako saioren ondoan merkeagoak diren metodoen bidez prozesuaren parametroak finkatzea ahalbidetu du.

Behin teknologia berriak industria mailan ezarri eta ezaugarri mekaniko egoki eta errepikakorak dituzten produktuak lortu direnean, hauetan lortzen ez diren beste ekoizkin batzuetara hedatu eta merkatu-kuota handitzea izango da hurrengo urratsa.

5. AIPAMENAK

Egileek Gipuzkoako Foru Aldundia eskertu nahi dute lan honetarako emandako diru-laguntzengatik. Bestalde Pello Urangak Eusko Jaurlaritzako Hezkuntza, Unibertsitate eta Ikerketa Saila eskertu nahi du Ikertzaileak Prestatzeko bekarengatik.

6. ERREFERENTZIAK

- [1] GLADMAN, T. 1997. *The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels*, The Institute of Materials, London, UK.
- [2] SHUTANG, Z., QI'AN, C., GUODONG, W. eta JIHZI, Z. 2002. «Progress and Prospect of Steel Rolling Technique in China». *Proceedings of the 44th Mechanical Working and Steel Processing Conference*, Orlando, USA, ISS, XL, 753-759.
- [3] LI, Y., CROWTHER, D.N., MITCHELL, P.S. eta BAKER, T.N. 2002. «The Evolution of Microstructure during Thin Slab Direct Rolling Processing in Vanadium Microalloyed Steels», *ISIJ Int.* **42**, 636-644.

- [4] COBO, S.J. eta SELLARS, C.M. 2001. «Microstructural Evolution of Austenite under Conditions Simulating Thin Slab Casting and Hot Direct Rolling», *Ironmaking and Steelmaking* **28**, 230-236.
- [5] CHATTERJEE, A. eta CHANDRA, S. 1999. «Thick, Thin or Ultrathin - that is the question in slab casting», *Steel World* **3**, 45-60.
- [6] MUOJEKWU, C.A., JIN, D.Q., SAMARASEKERA, I.V. eta BRIMACOMBE, J.K. 1996. «Thermomechanical History of Steel Strip during Hot Rolling - a Comparison of Conventional Cold-Charge Rolling and Hot-Direct Rolling of Thin Slabs», *Proceedings of the 37th Mechanical Working and Steel Processing Conference*, Warrendale, PA, USA, 1995, ISS XXXIII, 617-633.
- [7] LUBENSKY, P.J., WIGMAN, S.L. eta JOHNSON, D.J. 1995. «High Strength Steel Processing Via Direct Charging Using Thin Slab Technology», *Proceedings of the International Conference «Microalloying 95»*, Pittsburgh, PA, USA, ISS, 225-233.
- [8] *Mejora de la Competitividad de los Aceros Microaleados mediante Microaleación eta Tratamientos Termomecánicos*, CEIT eta ESII-k antolatutako kurtsoa, Donostia, 1996.
- [9] PRIESTNER, R., ZHOU, C. eta IBRAHEEM, A.K. 1994. «Carbonitride Precipitation in Cast Low-Carbon Steel Microalloyed with Ti and Nb», *Titanium Technology in Microalloyed Steels*, The Institute of Materials, London, 150-167.
- [10] URANGA, P., FERNÁNDEZ, A.I., LÓPEZ, B. eta RODRIGUEZ-IBABE, J.M. 2001. «Improvement of Microstructural Homogeneity in Thermomechanical Processed Nb Steels by Thin Slab Casting», *Proceedings of the 43rd MWSP Conference*, Charlotte, USA, ISS, XXXIX, 511-529.
- [11] FERNÁNDEZ, A.I., URANGA, P., LÓPEZ, B. eta RODRIGUEZ-IBABE, J.M. 2000. «Static Recrystallization Behaviour of A Wide Range of Austenite Grain Sizes in Microalloyed Steels», *ISIJ Int.* **40**, 893-901.
- [12] HOUGHTON, D.C., WEATHERLY, G.C. eta EMBURY, J.D. 1982. «Characterization of Carbonitrides in Titanium-Bearing HSLA Steels», *Proceedings of the Conference on Thermomechanical Processing of Microalloyed Austenite*, Pittsburgh, USA, 1981, TMS AIME, Warrendale, 267-292.
- [13] SUBRAMANIAN, S.V. eta ZHOU, H. 1991. «Quantitative Modelling of Solidification Precipitation and Recrystallisation Behaviour of Microalloyed Plates», *Proceedings of the International Conference on Processing, Microstructure and Properties of Microalloyed and other Modern HSLA Steels*, ISS, Warrendale, PA, USA, 1991, 23-30.
- [14] KASPAR, R. eta PAWELSKI, O. 1994. «Thermomechanical treatment of direct charged thin slabs», *Proceedings of the 2nd European Conference on Continuous Casting «METEC 94»*, Düsseldorf, Germany, 390-395.
- [15] JONAS, J.J. 1998. «Effect of Interpass Time on the Hot Rolling Behaviour of Microalloyed Steels», *Proceedings of the International Conference on Microalloying in Steels « -as»*, San Sebastian, Spain, Materials Science Forum 284-286, Trans Tech Publications, Switzerland, 1998, 3-14.
- [16] PRIESTNER, R. eta ZHOU, C. 1994. «Application of Microstructural Models to Hot Direct Rolling of As-Cast Austenite», *Advances in Hot Deformation Textures and Microstructures*, TMS, Warrendale, PA, USA, 121-138.