

2205 motako duplex altzairu austenoferritiko herdoilgaitzaren simulazio-termomekaniko bidezko berotako deformagarritasuna

A. Iza-Mendia, I. Gutiérrez, J.J. Urkola[†]

CEIT eta Donostiako Injineru Industrialen Goi Mailako Eskola.
P.K.1555, 20009 DONOSTIA

Abstract:

The behavior of 2205 Duplex Stainless in deformation processes is under study. The present work aims to relate the deformability of this steel with its chemical composition and structure and also to define the influence of process conditions such as temperature, strain-rate and deformation grade.

One of the main difficulties faced by the industrial rolling of α/γ duplex stainless steel is edge cracking and sliver formation. In order to detect defect generation and to define rolling schedule design criteria, the material has been fully characterized.

Altzairu herdoilgaitza: Material Unibertsala

80 urte besterik ez duen altzairu herdoilgaitza, "material unibertsal" gisa aldarrika daiteke bere erabilpen-esparru izugarria dela eta. Gaur egungo altzairu-produkzioa men-

debaldeko herrialdeetan, 1950. urtean zena baino 11 aldiz handiagoa da, ikaragarritzko zabalkunde honen arrazoi nagusia, altzairu herdoilgaitzaren aplikazio industrialak finkatzea izan delarik. Industria Kimiko eta Petrokimikoan izan du material honek erabilpen zabalena. Baita ehungintzan, papergin-

[†] Bihoakio gure oroitzapenik saminena lanean maisu eta lagun izan genuen Jabier Urkolari.

tzan, etxerako produktu berrien fabrikazioan eta abarretan ere. Bestetik, elikagaien industriak bete behar dituen osasunari buruzko lege eta arauak, altzairu herdoilgaitza erabiltzea bultzatu dute. Ingurugiroaren babeserako legeek ere, altzairu herdoilgaitzaren kontsumoa potentziatu dute, material honen produkzioak sortzen duen ingurugiro-kalte murriztagatik eta birziklatzeko duen erraztasunagatik.

Beste materialek ez bezala, bitzta modernoko eskaerei fin erantzuten dio funtzionalitatez, iraupenez nahiz kostu-efizientiaz.

Ildo horretatik, altzairu herdoilgaitzaren ekoizpen-prozesuan berrikuntza teknologiko ugari sartu da kostuak txikiagotzeaz gainera eskala handian produzitzen ahal delarik. Prozesu berritzaile horien eta produktuen ikerkuntza eta garapen jarraia on-dorio dira, altzairu hauen propietate mekanikoen hobekuntza eta korrosioarekiko nahiz oxidazioarekiko erresistentzien hobekuntza etengabea. Prezioen lehiakortasuna ere handia da gainerako material alternati-boekiko.

Europako mendebaldean, Italiak eta Alemaniak dituzte industria egitura eta ekonomia bortitza eta altzairu honen kontsumo-hazkunderik handiena ere bai aldi berean.

Artikulu honetan aurkezten den altzairua hain zuzen, estatuan oraindik maila esperimentalean dagoen eta, beraz, industrialki produzitzen ez den Duplex 2205 motako altzairu herdoilgaitza da.

2205 Duplex altzairu herdoilgaitza, Fe-Cr-Ni sistemako aleazioa da, zeina ferrita eta austenitaz osatua den. Duplex altzairu herdoilgaitzen gainerako altzairu herdoilgaitzekiko abantaila honakoa da: konposizioan Cr- eta Mo-kantitate handiagoak hartzeko gai izatea eta, beraz, korrosioarekiko erresistentzia eta giro-tenperaturan duten erresistentzia mekanikoa hobea izatea.

Duplex aleazioak bi fasez osatutako mikroegitura du. Duplex altzairu herdoilgaitza bi faseak herdoilgaitz dituen da. Bi faseek % 12 Cr badute gutxienez. 2205 Duplexak hain zuzen % 22 Cr (eta % 5 Ni) du. Herdoilgaitzasuna, ohizko ingurune korrosibotatik materialak eraso horietatik babesteko, geruza pasiboa sortzeko duen gaitasuna da.

Fase herdoilgaitz arruntenak, ferrita (gorputzean zentraturiko sare kubikoa, BCC) eta austenita (aldeetan zentraturiko sare kubikoa FCC) dira. 1. irudian mikroskopia optikoz hartutako % 50 α / % 50 γ duen 2205 motako altzairu herdoilgaitza erakusten da.



1. irudia. % 50 α / % 50 γ duen 2205 motako altzairu herdoilgaitzaren mikroegitura urtu landugabe egoeran. % 20 potasa-disoluzioak elektroerazoz ferrita fasea ilundu egiten du. Austenita fasea argi ikusten da irudian.

Berotako deformazioa

Tratamendu termomekanikoen helburua, berotako konformazio-prozesuen kontrolaz, altzairutegitik datozen produktuei forma eman eta produktuen propietate mekanikoen hobekuntza lortzea da. Ijezketa kontrolatua eta deformazio ondorengo hozte kontro-

latua dira, besteak beste aipa daitezkeen tratamendu termomekanikoak.

Materialen berotako deformazioaren ezau-garriak hauexek dira: deformazio altuak aplikatzen dira ($\epsilon = 0.5-5$) oso deformazio-abiadura azkarretan ($\dot{\epsilon} \approx 10^2 - 10^3 \text{ s}^{-1}$), temperaturak 0.6 u.t. (urtze-tenperatura) baino handiagoak izaten direlarik. Temperatura hauetan, materialek harikortasun handia eta erresistentzia mekaniko txikia dute. Horrela deformazio handiak ezar daitezke iraganaldi gutxitan.

Ijezketan, hain zuzen, altzairuaren harikortasuna aprobeztatuz, hau da, plastikoki deformatzeko material batek duen gaitasunari esker, altzairuaren zeharkako sekzioa txikiagotu egiten da eta bolumena konstantea denez, produktua luzatu egiten da ijezketaren zehar. Forma emateaz ezezik, barne-egitura norabide egokietan luzatzea lortzen da, ondoren jasan beharko dituen esfortzuekiko erresistentzia handiagotu egiten delarik.

Simulazio-saiakuntzen abantaila

Azken urteotan laborategi-mailan egindako berotako deformazio-saiakuntzen bidez, materialen isurpen-tentsioen eta harikortasunen balioak merke kalkulatu ahal izan dira. Horrela, ijezketan zilindroek jasan behar dituzten esfortzuez gain, materialak pitzatzen hasten direneko deformazioen balioak ezagutu daitezke, ondorioz prozesu industrialaren deformazio-sekuentzia definitu ahal izan delarik.

Bestalde, berotako deformazioan Metalurgia Fisikoak eginiko aurrerakuntzei esker, materialen erresistentzian eta mikroegituraren deformazio-aldagaiak izango duten eragina aurrean ahal izan dira. Are gehiago, mikroegitura eta propietateen artean dauden erla-

zio koantitatiboak idazteko modua izan da, eta ondorioz, prozesu industrial konplexuetan gerta daitezkeen mikroegitura-aldaketak ordenadorez lagunduriko eredu bidez oso zehatz auresan daitezke. Eredu horien garapena, noski, laborategian egindako simulazio-saiakuntzetako datuetan oinarritzen da.

Deformazioan dauden parametro makroskopikoen (hala nola temperatura, deformazio-kantitate eta deformazio-abiaduren) balioak determinatzeko balio behar dute ereduak batetik, eta deformazio bitartean nahiz ijezketaren iraganaldi bitarteko denboran gertatzen diren mikroegituraren aldaketak zehazteko bestetik.

Deformazio bitartean, materialean fenomeno dinamikoek (hara nola deformazioaren bidezko gogortzea eta biguntzea) aldi berean eragiten dute, eta deformazio ondorengo hozte-prozesuan, biguntze-fenomeno estatikoek.

Fenomeno dinamiko nahiz estatiko horien azterketak, azken produktuaren mikroegitura eta honekin guttiz erlazioatutako propietate mekanikoak auresaten lagun dezake. Lehen esandakoaren neurri berean, praktika industrialean ezagutza hau eskuratzeko erabakitzailea da: deformazio-saiakuntza, mikroegitura optimoa lortzeko (hau da, propietate jakin batzuk edukiko dituen azken produktua sortzeko) defini baitaitezke alde zuzenetatik.

Egitura-aldaketa dinamikoak eta estatikoak

Materiala deformatzen denean, egitura-akats bezala bete eta materiala egoera energetiko ezegonkorrera iristen da. Deformazioaren bidezko gogortzea esaten zaio honi.

Deformazioan zehar eta ondoren, hala ere, materiala egoera termodinamiko egonkorra-

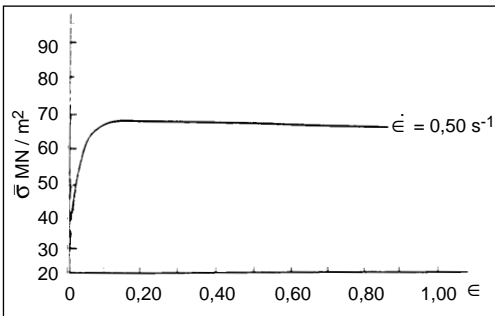
gora eramango duten biguntze-mekanismoak izaten dira. Prozesu hauekin batera mikroegitura-aldaketak izaten dira.

Laburbilduz, berotako deformazio-mikroegiturak bitan sailka daitezke biguntze-fenomenoen arabera: berriztatze dinamikozko mikroegiturak eta birkristaltze dinamikozko mikroegiturak.

Lehen talde horretan aleazio ferritikoak sar genitzake eta ezaugarri esanguratsuenak hauexek dira:

Deformazio-kantitate baterako, deformatutako aleen luzapena fluxu plastikoaren norabidean, eta ongi definituriko azpiegitura, forma ekiaxikoa duten azpialeez osatua. Azpialeen tamaina isurpen-tentsioaren araberakoa da.

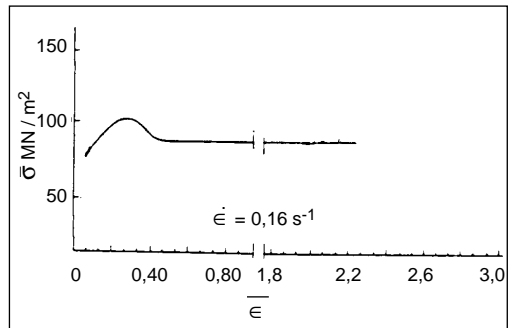
Tentsio/deformazio-kurban ikus daitekeen (ikus 2. irudia) tentsioaren gorakada azkarra dago lehenik, eta ondoren, balio egonkorrean mantentzen da deformazioan zehar. Tentsioaren balio horri *egoera egonkorreko tentsioa* esaten zaio.



2. irudia. Altzairu herdoilgaitz ferritikoari dagokion tentsio-deformazio kurba, saiakuntza $T = 917\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperaturan eta $\dot{\epsilon} = 0,5\text{ s}^{-1}$ deformazio-abiaduran egin denean. [1].

Dinamikoki birkristaltzen diren materiale-tan (aleazio austenitikoetan, besteak beste), biguntze-mekanismo hau deformazio jakin

bat gainditzen denean bakarrik aktibatzen da. Deformazio horretaraino materialak metatu duen energiaren, ale-mugimendua eragiten da, deformazioaren ondorioz materialean sortu diren akatsak ezabatuz. Prozesu honen hasierarekin tentsio/deformazio-kurbak beherapena du, (ikus 3. irudia) gogortutako material deformatuaren zati handi bat akatsik gabeko materialez ordezkatu izan delako. Mekanismo honen bidez ez dira azpialek sortzen; ale berriak baizik, eta hauen tamaina ere egoera egonkorreko tentsioaren menpekoa da. Kurbaren tontorrari dagokion tentsioa, σ_y , *tontorreko tentsioa* izenez ezagutzen da.



3. irudia. Mekanizagarritasun erraza duen altzairu baten tentsio/deformazio-kurba, saiakuntza $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperaturan eta $\dot{\epsilon} = 0,16\text{ s}^{-1}$ deformazio-abiaduran egin denean. [2].

Baina berotako deformazioaz sortutako mikroegiturek biguntze estatikozko-prozesuak ere (berreskurapen estatikoa eta/edo birkristaltze estatikoa) jasan ditzakete, deformazioa amaitu ondoren (horregatik du estatiko hitza) materiala temperatura altutan mantenduz gero.

Biguntze estatikoaren zinetikak definituko du materialaren azken mikroegitura eta berarekin mikroegituraren parametro nagusia: ale-tamaina. Honek mugatuko ditu,

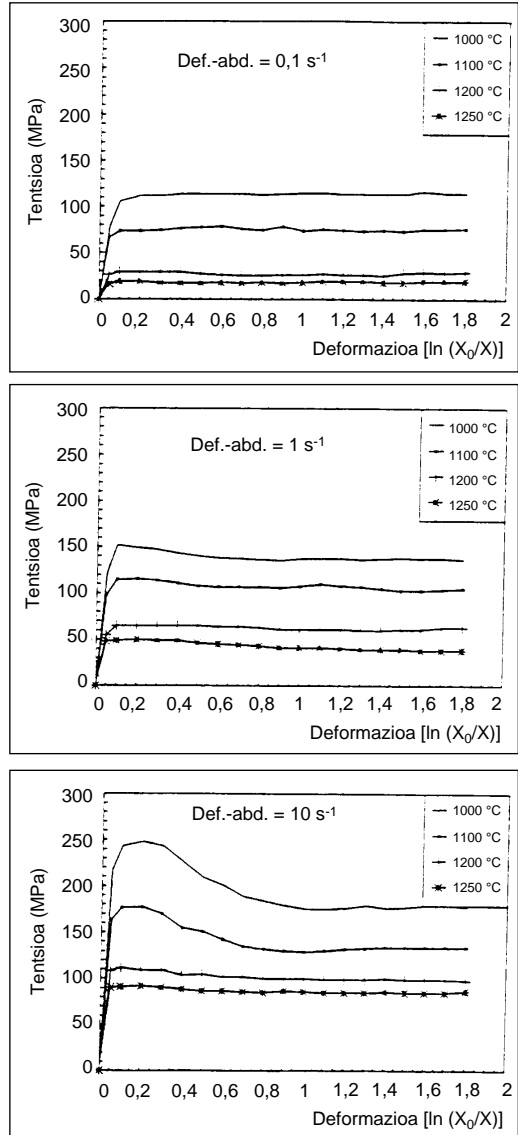
lehen esan bezala, azken produktuaren propietate mekanikoak.

Garrantzitsua da, beraz, oso, fabrikazio-prozesuan zehar ale-tamainaren eboluzioa ezagutzea eta beharrezko aldaketak egitea, ahalik eta ale-tamaina txikiena lortuz azken produktuaren optimizazioa lortzeko.

Austenita eta ferrita faseen berotako erresistentziak eta deformazio bitartean nahiz ondoren gertatzen diren gogortze- eta biguntze-mekanismoak desberdinak direla ikusi ondoren, bi fase horiez osatutako 2205 Duplex altzairu austenoferritikoaren berotako deformazioak arazo konplexua sortarazten dio zientziari eta prozesaketa industrialari.

Ikus dezagun lehenik konposio kimikoa edo egitura-aldagaiak batetik, eta tenperatura, deformazioa eta deformazio-abiadura aldagaiak bestetik, berotako konpresio lau-ko saiakuntzan materialaren erantzunarekin nola erlazionatzen diren, eta ondoren azter dezagun 2205 Duplex altzairu austenoferritikoaren portaera ijezketa-prozesuan faseen deformagarritasunen arabera.

Lehenik bada, berotako konformazioa izaten diren biguntze-fenomenoek gain, tenperaturaren, eta deformazio-abiaduraren eragina tentsio/deformazio-kurbetan honela uler daiteke: tenperatura jaisteak edo/eta deformazio-abiaduraren handiagotzeak isurpen-tentsioaren gorakada eragiten dute. 4. irudian % 50 α / % 50 γ duen 2205 motako altzairu herdoilgaitzean eginiko konpresio lau-ko saiakuntzen tentsio/deformazio-kurbak ageri dira. Tenperaturak eta deformazio-abiadurak tentsioan duten eragina argi ikus daiteke bertan. Saiakuntza mekaniko hauek ACERINOXen burutu ziren, entitate honek eta CEITek elkarrekin burutu zuten *Altzairu austenoferritikoaren simulazio termomekaniko bidezko berotako deformagarritasunaren optimizazio eta karakterizazio mikroegiturala* izeneko proiektuaren barnean.



4. irudia. 2205 Duplexaren deformazio lau-ko konpresio-saiakuntzei dagozkien tentsio/deformazio-kurbak. Deformazio-abiadurak 0.1 s^{-1} , 1.0 s^{-1} , eta 10 s^{-1} , dira goitik behera eta saiakuntza-tenperaturak 1000, 1100, 1200, eta 1250 °C abiadura bakoitzean. [3].

Deformazio-abiadura handienetan eta tenperatura baxuenetan lortzen dira tentsioaren balio altuenak.

Egoera-ekuazioak, deformazioaren funtzioan (ϵ), temperatura (T) eta deformazio-abiadura ($\dot{\epsilon}$), materialaren erantzunarekin honela erlazionatzen ditu:

$$Z = \dot{\epsilon} \cdot \exp Q / RT = A (\sinh \alpha \sigma)^n$$

non:

- Z, Zener-Hollomonen parametroa,
- Q, aktibazio-energia gogortze- nahiz biguntze-prozesuetarako,
- R, gas perfektuen konstantea, n konstantea, zeinak 5 balio inguru hartzen duen eta A, eta α materialaren konstanteak diren.

Hasierako mikroegituraren menpe ez da goen espresioa izaki, materialaren *egoera-ekuazio* izenda daiteke eta hau erabilita isurpen-tentsioa edo/eta egoera egonkorreko tentsioa kalkula daiteke edozein T eta ϵ/t hartzen delarik, aurretiko historia termome-

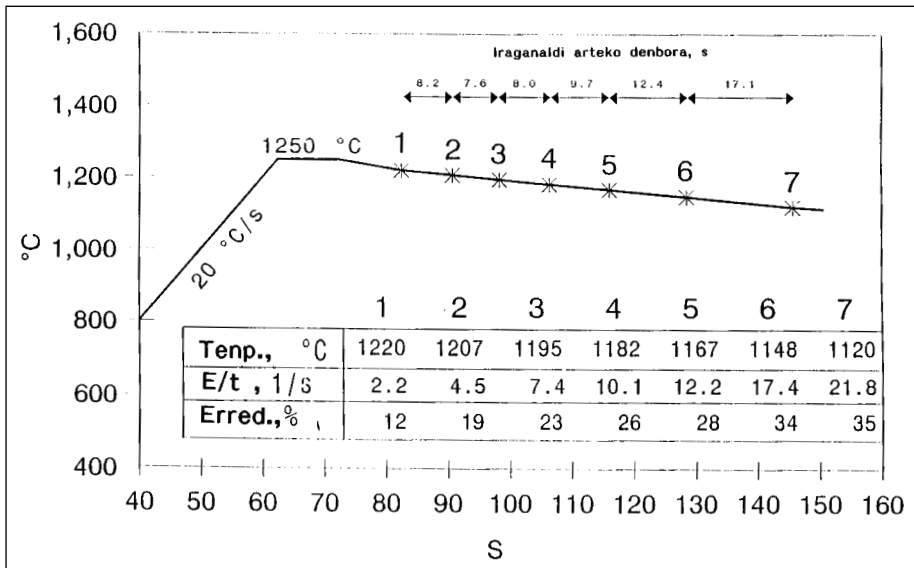
kanikoa edozein dela ere (hasierako ale-taina eta aurreko hotzetako deformazioa, adibidez).

Berotako Ijezketaren Simulazioa

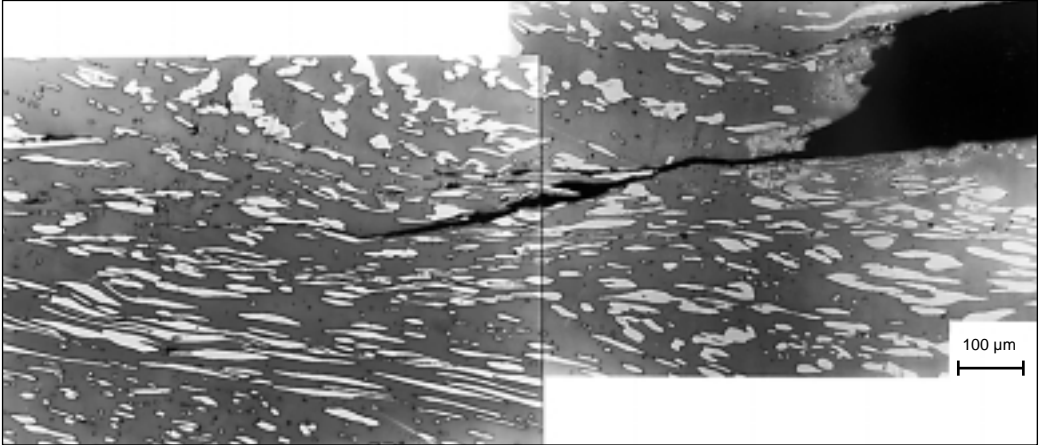
2205 Duplex altzairuaren deformagarritasuna aztertu asmoz, altzairuen prozesaketan normalean erabiltzen den ijezketa-programa industrialia aplikatu zitzaion duplexari aldaketa mikroegituraren jarraipena egin ahal izateko.

Programa horren aldagai nagusiak esperimentalki birsortu ziren 2205 Duplex altzairuan, konpresio lauko saiakuntzak iraganaldi anitzetan Gleeble 1500 simulazio-sistema bidez burutu zirelarik.

5. irudian, Gleeble 1500 simuladorean egiten den 7 iraganaldiko berotako ijezketa-saiakuntzaren parametroen balioak (hala nola temperatura, erredukzioa, deformazio-



5. irudia. Gleeble 1500 simuladorean berotako ijezketarako programatutako aldagaiak eta balioak. Ijezketa-programa estandar batetik jaso eta egokituak dira.



6.a. irudia.

-abiadura eta iraganaldien arteko denboren datuak) azaltzen dira.

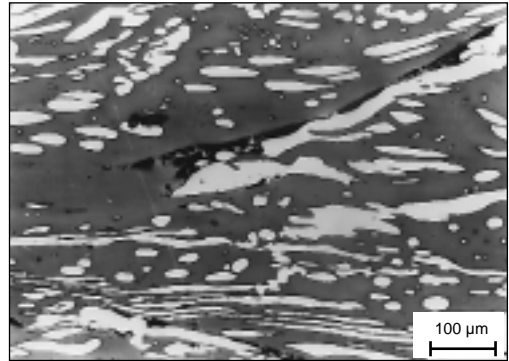
Saiakuntza partzialak programatu ziren, mikroegituraren azterketa 1,4,5,6 eta 7 iraganaldi ondoren aztertu nahiz.

Mikroegitura-aldaketak ezagutu asmoz, laginen bat-bateko hozketa (deformazio horretaraino materialak garatu duen deformazio-mikroegitura izoztu arren) hurrengo iraganaldian sartu baino lehentxeago ur bidez egin zen. (7. iraganaldiaren ondoren, lagina 5 segundoz utzi zen hoztu aurretik).

Saiakuntzen ondoren honakoa aurkitu zen: duplexaren laginek, zenbait kasutan, diagonalki hazitako pitzadurak eta hausturak zituztela esfortzu ebakitzaila handiak metatzen ziren zonetan. Gainazalean hasi eta barnealdera sartzen ziren, ferrita/austenita interfaseari jarraituz (ikus 6. irudia).

Lehen emaitza hau guztiz ados dator aurretik eginiko zenbait ikerkuntzarekin.

Jakina da egitura bifasikoetan harikortasuna berotan okertu egiten dela. Harikortasun handia duten bi fase bereizirik, material bifasikoa osatzeko elkartzen direnean, bi faseetako edozeinek bakarka duenarena baino harikortasun baxuagoa izaten du duplexak

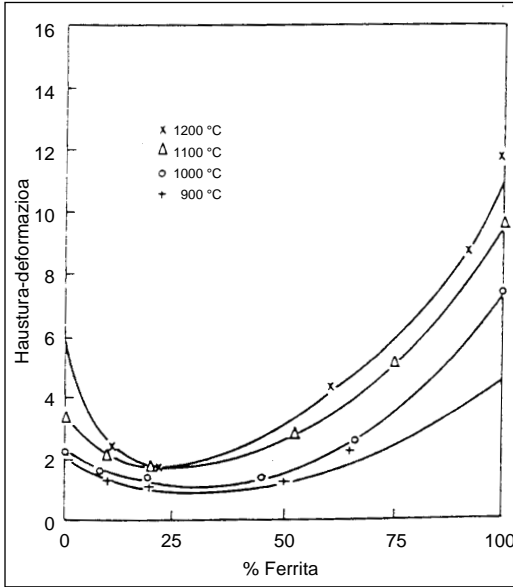


6.b. irudia.

6. irudia. a) Gainazalean sortzen den pitzadura materialaren barnealdera luzatzen da. Gainazaletik urrun badira akatsdun zonak ere, geziek adierazten dutenez. b) Pitzaduraren nukleatzea bi faseen mugan gertatu eta hortik luzatzen da.

(ikus 7. irudia). Altzairu austenoferritikoetan bi faseak bereizten dituen mugan pitzadurak nukleatzen dira eta ondorioz egitura hauen harikortasuna asko murrizten da.

Saiatutako probeta horien mikroskopia optiko eta elektroniko bidezko azterketaren emaitzek honakoa adierazten dute: 2205

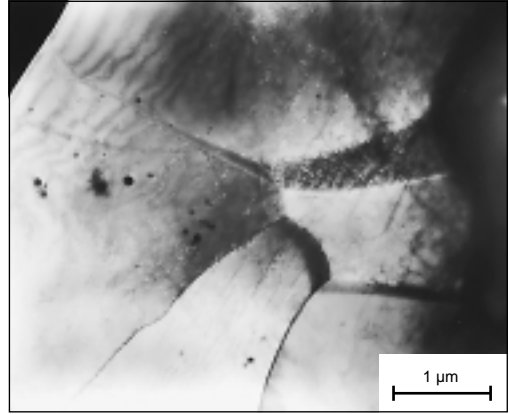


7. irudia. Harikortasunaren aldaketa aleazio bifasikoetan, bi faseen proportzio-erlatiboen funtzioan. [4].

Duplex altzairuaren harikortasun-problema, deformazio-maila jakin bat iritsiz gero α/γ interkararen deformagarritasun-etenaz sortzen direla.

Deformazioaren lehen uneetan eta deformazio-abiadura txikia denean ($\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$), ferritak, fase bigunak, badirudi nahikoa denbora baduela austenitaren (fase gogorre-naren) inguruan deformatzeko, ezarritako tentsio eta deformazio handienak ferritak jasaten dituelarik. *Interphase boundary sliding*, IBS bidez, hau da α/γ muga bidezko labainketaz gertatzen dela dirudi. Mekanismo honek tentsio-transferentzia galarazten du austenita aldera.

Arazonamendu hau mikroskopia elektronikoaz egindako behaketetan oinarritzen da. Ferritak deformazio baxutan ere ($\epsilon = 0.11$) ongi definituriko azpialez osatutako deformazio-azpiegitura du, ferritan izaten



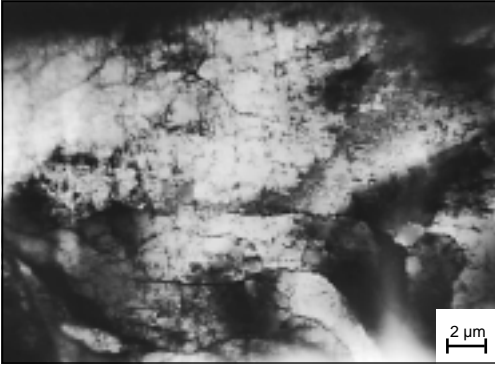
8. irudia. Transmisiozko Mikroskopia Elektronikoaz lortutako irudia. Bertan akats gutxiko ferrita-azpialeak ikus daitezke. Dislokazioak azpiale-mugetan metatzen dira.

den berrizatze eta biguntze-fenomenoari dagokionez. (Ikus 8. irudia).

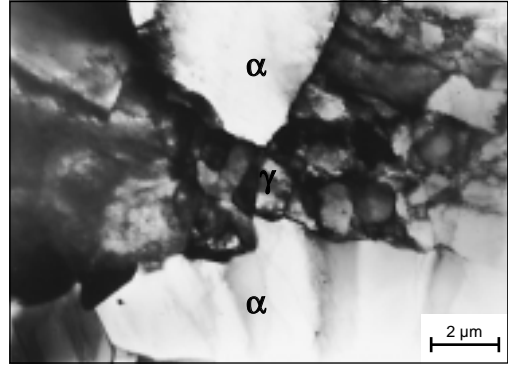
Austenitaren aleek berriz, ez dute berrizatze aztarnarik erakusten eta 0.35eko deformazioa (ferritak biguntzeko behar duenarena baino zerbait handiagoa) iragan arte ez dira ijeketa-norabidean orientatzen. Austenitaren mikroegitura dislokazio-dentsitatea handia da; austenitak, ferritak ez bezala, berotako lanarekiko duen erresistentzia altua baita. (Ikus 9. irudia).

Deformatutako mikroegitura zelularra da eta hipotesi gisa honakoa proposatzen da: egitura zelular horren eraginez, interfasearen profil irregularrak, (ikus 10. irudia) IBS deformazio-mekanismoa zaildu egiten duela deformazio jakin batera iritsi ondoren, eta ondorioz, tentsio lokalak handiagotu egiten direla pitzaduren nukleatzea sortaraziz.

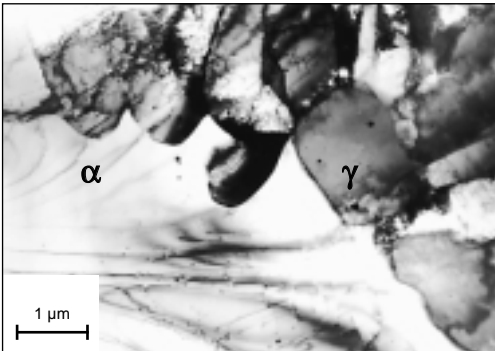
Saiakuntza 10 s^{-1} deformazio-abiadura azkarrean eta tenperatura baxuagoetara egiten denean aldiz, deformazioaren banaketa bi faseen artean berdinagoa dela dirudi; ez baitzaio ferritari austenitaren inguruan



9. irudia. Mikrografian deformazioz sorturiko mikroegitura austenitikoak ikus daitezke. Akats-kantitatea edo dislokazio-dentsitatea alearen barnean altua da eta bertan egitura zelularren hastapenak aurki daitezke.



11. irudia. Transmisiozko Mikroskopia Elektronikoaz harturiko mikrografia honetan, txandakaturako bi ferrita-ale eta austenita-ale bat ikus daitezke. Austenitak 1 μm tamaina inguruko egitura zelularrak garatzen ditu. Ferritak aldez, azpialek osatzen ditu.



10. irudia. Ferrita/austenita mugaren forma, austenitaren mikroegiturak definitzen du. Egitura zelular austenitikoak oso ale-muga irregular eta konplexua sortzen du, irudian ikus daitezkeenez.

lehen bezala egokitzeko denborarik ematen. (Ikus 11. irudia).

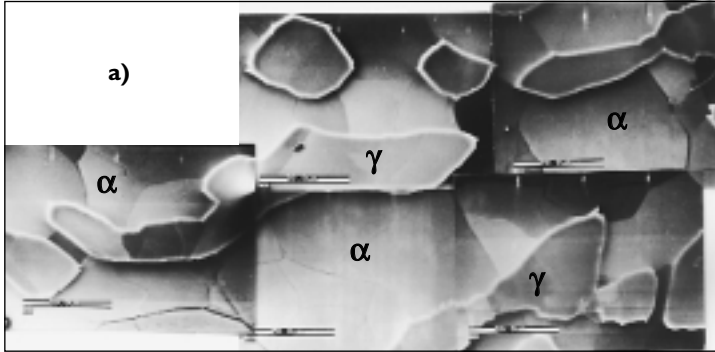
Deformazioaren transferentzia austenitarantz eraginkorragoa den kasu honetan, isurpen-tentsioaren gorakada espero zitekeen tentsio/deformazio-kurbetan eta hala gertatu da; austenitaren berotako deforma-

zioaren erresistentzia ferritarena baino altuagoa baita. (Ikus 4. irudia).

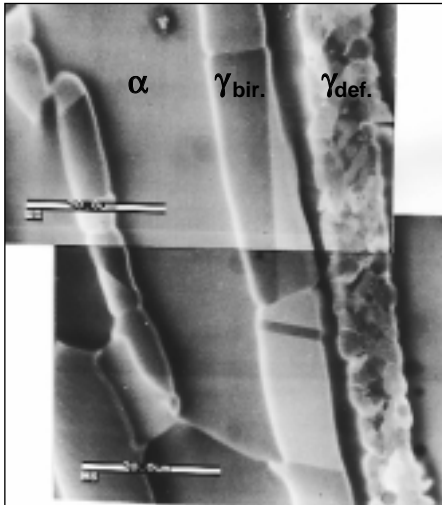
Birkristaltzea gertatzeko indar bultzatzailea deformazioz metatutako energia kantitatea izanik, fase gogorrean (austenitan alegia) izango da birkristaltze (biguntze dinamiko) nabaria, tentsio/deformazio-kurbetan tontor baterainoko tentsio-igoeraren ondoren kurbak egiten duen beherakadak adierazten duenez.

Berotako ijezketan zazpi iraganaldi jasan dituen austenitak, deformazio- eta birkristaltze-egiturak nahasiak ditu eta guztiz ados dator iraganaldi desberdinetan ezarritako deformazio-abiadurekin. Ferritak bere azpiegitura berezia mantentzen du. 12. irudian 1, 5, eta 7 iraganaldiren ondoren duplexak garatzen duen mikroegitura erakusten da. STEMez egindako mikroargazkiak dira.

CEIT eta CSM (Erroma) erakundeen arteko lankidetzaren ondorioz sortutako J.H. Bianchiren “2304 duplex altzairu herdoilgaitzean berotako konformazioak sortzen duen

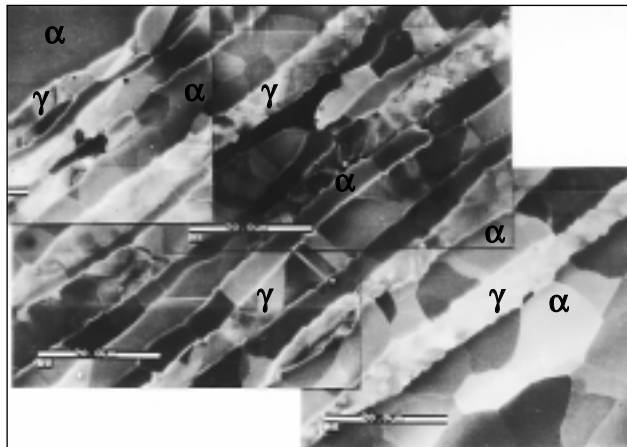


b)



12. irudia. a) Lehen iraganaldian ezarritako deformazioa txikia izan da eta ondorioz bi faseen mikroegitura hasierakoaren berdintsua da. b) Bosgarren iraganaldiaren ondoren, austenita-aleak ijezketa-norabidean luzatzen dira. Zerbait lekutan austenitak birkristaltze estatikoa edo metadinamikoa jasan du, aleen barnealdean azaltzen diren maklek adierazten dutenez. Austenita/ferrita mugak forma jarraia du austenita birkristaldu den kasuan. Austenita guztiz deformatua dagoen alean berriz, muga irregularra da. c) Zazpigarren iraganaldiaren ondoren, materialak aurreko iraganaldietako egitura berdintsua du. Ferritak azpialeak garatu ditu.

c)



akatsen hastapena” deritzan artikuluan oinarrituta, ondorengo eztabaida plazara daiteke duplex hauen prozesaketa industria-laren gainean:

Aurretik egindako zenbait lanek honakoa ondorioztatu zuten: fase desberdinetan deformazio-banaketa berdintsua izango zela, deformazio-abiadura azkarrak erabiltzen baziren. Bestela ez. [5].

Deformazio-abiadura geldoa denean berriz, deformazioaren lehen uneetan deformazio gehientsuena ferritak jasaten du, ale-mugen bidezko labainketa bidez. *Interphase Boundary Sliding (IBS)* izenez ezagutzen den mekanismoaren bidez, fase bigunena gogorrenaren inguruan deformatzen da ale-mugen mugimenduz.

Baina bada deformazio-banaketan eragina duen beste faktore bat: duplex aleazioaren morfologia: austenita-aleen morfologia biribiltzua edo luzatuak mugituko baitu tentsioaren nahiz deformazioaren tranferentzia bi faseetara.

Bi faseek berotako konformazioan duten erresistentzia desberdinen ondorioz, $\Delta\sigma_{yx}$ interfaseko isurpeneko tentsio-diferentzia definitzen da, zeina gehientsuenetan $\sigma_{\text{fase gogorra}}/\sigma_{\text{fase biguna}}$ karga-transferentzia indizeaz neurtzen den.

Indize hau altuegia denean (hau da, fase gogorrak, austenitak alegia, deformazioz garatzen duen erresistentzia edo isurpen-tentsioa altua denean) ferritak, fase bigunak garatzen duenarekiko, akatsak sortzeko arriskua dagoela uste da.

Austenita-aleak luzaturik daudenean, hain zuzen, deformazio-transferentzia fase horretarantz handiagoa dela jakinik, kasu hauetan izaten dira *karga-transferentziako indizerik* altuenak, eta, ondorioz, tentsio lokalek interfasean eragindako pitzadurak ere bai.

Prozesamendu bitartean bestalde, gauza jakina da deformazioaren, deformazio-abiaduraren eta tenperaturaren balioek gradiente lokalak jasaten dituztela, [6, 7, 8, 9, 10,], eta ondorioz, puntu desberdinetan tentsio-diferentziak egon daitezkeela.

Materialen karakterizazioaren eta prozesaketaren ereduztapenaren helburu dira akatsak zergatik sortzen diren detektatzea eta hauek sortzea galaraziko duen ijezketa-diseinurako irizpideak definitzea.

Azterketa, ijezketaren bi etapa nagusietan egin da: ijezketa-iraganaldien bitartean, eta iraganaldien artean dagoen denbora tartean.

Edozein iraganalditan, lehenean salbu, karakterizazioari dagokionez mikroegitura lau azpifase izan daitezke:

- partzialki deformatutako ferrita.
- birkristaldu gabeko austenita.
- gutziz birkristaldutako austenita eta tentsio kritikora iritsiz gero, pusketatan hausten den austenita.
- ebaki anitz dauzkaten deformatutako ferrita-ale luzeak.

Ijezketa-prozesu osoan mikroegitura-aldaketak fase bakoitzean etengabe gertatzen ari direnez, interfaseko karga-transferentziaren indizea ere desberdina izango da une eta zona bakoitzean, eta ondorioz fase bakoitzak jasaten duen deformazioa ere bai.

Totxo lauak labetik ijezketa-trenera mugitzean eta iraganaldien artean jasaten dituen bero-galerak, barnealde beroenetik gainazal alderantz izaten den bero-kondukzioaz konpentsatzen da neurri batean.

Toki-aldaketan 100 °C-rainoko galerak izan daitezke, eta iraganaldien artean berriz, erdialde eta gainazalaren arteko tenperatura-diferentzia 55 °C-raino iritsi daiteke.

Tenperatura-diferentzia hauek, noski, eragina izango dute materialaren portaeran

ere, aurreko atal batean azaldu denez; tenperaturak isurpen-tentsioan zein eragin duen egoera-ekuazioaren bidez jakina baita.

Azterketa honek akats-prebentziorako zenbait neurri formulatzera eraman du:

Adibidez, austenitaren aleen tamaina batetik eta aleen luzeraren eta zabaleraren arteko erlazioa bestetik ahalik eta txikien mantentzea gomendatzen da.

Bigarren punturako birkristaltze estatikoa areagotzea litzateke soluzioa; birkristalizazioaz, lehen ikusi bezala, forma ekiaxikoa duten ale berriak sortzen baitira.

Bigarrenik, iraganaldi bakoitzeko erredukzioak txikiagoa behar du izan, eta deformazio-abiadura mantsoagoak proposatzen dira.

Bi neurri horiekin, austenita-aleen luzera berauen haustura sortaraziko duen neurri kritikoraino iritsi ez dadin lortzen da.

Azkenik, tenperatura baxutan ijezten bada, gainazaleko pitzadura-akatsak murriz daitezke; baina ertzetako pitzadurak galarazi nahi badira, tenperatura altutan ijezte gomendatzen da.

Kontrako bi irizpideei aurre egiteko, aurrez arbastu-treanean berotzea proposatzen da.

Duplex altzairu herdoilgaitzaren ijezketa-aren arrakasta, deformazio bitartean gertatzen diren mikroegitura-aldaketa dinamikoetan dago oinarritua, eta ikusi bezala, ez dira iraganaldien arteko birkristalizazio estatikoaz guztiz desagertzen.

Ijezketa-ereduen konfigurazioan hasi berriak gara eta urteak pasatuko dira oraindik 2205 Duplex altzairu herdoilgaitza industrialki estatu-mailan eta akatsik gabe produzitu ahal izan arte.

BIBLIOGRAFIA

- [1] URKOLA, J.J.: Ph. D. Thesis. Univ. Sheffield.
- [2] NAZABAL, J.L.: Doktorego Tesia, Donostia, iraila 1979.
- [3] A. PAUL, J.L MARTOS, R. SANCHEZ.: "Behavior of 2205 duplex stainless under hot working conditions". Proc. Innovation Stainless Steel, 3, 297-302.orr.; 1993.
- [4] MULLER, T.L.F.: Ph. D. Thesis. Univ. Sheffield.
- [5] CHANDRA, T., DUNNE, D., CAMPBELL, P.: "Effect of phase morphology on restoration behavior of austenite-ferrite two phase steels at high temperature". Proc. 7th Int. Conf. on Strength of Metals and Alloys., 947-952.orr.; Mc Queen ed., Montreal, 1985.
- [6] BIANCHI, J.: "Development of a model for hot strip rolling of ferritic steels", ECSC Agreement 7210.EC/403, CSM Rep. 7816R, abendua 1992.
- [7] BIANCHI, J.: "Application of FEM to hot rolling", ECSC-Sweden Project, CSM Rep. 7451R, azaroa 1991.
- [8] BIANCHI, J.H., PETRONE, E.: "Modeling of multipass rolling of steel plates", 701-706.orr., Numiform'92, Sophia Antipolis, Chenot-Wood-Zienkewics ed., Balkema Publ., 1992.
- [9] BUESSLER P.: "Application of FEM to hot rolling", Fin. Rep., ECSC contract 7210.EB/304, IRSID, 1992.

[10] E.C.S.C. Sweden collaborative Project, contracts N 7210.EB/104/201/304/406/503/ /701/805/932. "Application of Finite Element to hot rolling and deep drawing of steels", Final Rep., CSM, 1992.

ERREFERENTZIA OROKORRAK

- JONAS, J.J., SELLAR, C.M., McG TEGART, W.J.: Met. Rev.,130, 1969,.1-24.
- SELLAR, C.M., McG TEGART: Int. Met. Rev. 158, 1972,.1-24.
- McQUEEN, H.J., JONAS, J.J.: Treatise on Materials Science and Technology, 6.alea, Plastic Deformation on Materials 393-493.orr. Academic Press New York, 1975.