

Inconel 625-aren tentsio/deformazio kurben ereduztapena

B. López Soria eta J.J. Urkola Galarza

Gipuzkoako Ikasketa eta Ikerketa Teknikoen Zentrua (CEIT),
Donostia
Donostiako Injineruen Goi Mailako Eskola

Abstract

Modelling the microstructural changes and working forces during industrial hot working operations provides a powerful method of understanding and optimising the interactions of material and process variables. It relies on the availability of basic quantitative relationship to describe the microstructural and flow stress in terms of the engineering variables. This paper considers relationships which describe stress-strain characteristics and propose a mathematical model in order to study the stress-strain curves of a Ni base superalloy (Inconel 625) as a function of the temperature, strain rate, etc. The experimental stress-strain curves were determined by torsion test. Zener-Hollomon parameter was the basis to propose different equations which allow to reproduce the stress-strain curve adequately: hardening zone, restoration zone and dynamic recrystallization zone.

Sarrera

Austenitaren deformazioan zehar, berotako lanean erabilitako ohizko temperatura eta deformazio-abiaduretan, tentsio/deformazio kurbak deformazioaren bidezko gogortzearen, berriztatze dinamikokoaren eta birkristaltze dinamikokoaren (deformazio kritiko bat gainditzeko denean) arteko balantzea dira. Horren ondorioz, etengabeko deformazio isotermikorako isurpen-kurbak itxura berezia du. Prozesu industrialetan aldiz, ijezketan ala forjaketan adibidez, deformazioa denbora-tartez bereizitako iraganaldietan aplikatzen da.

Denbora-tarte horietan mikroegitura, berriztatze eta birkristaltze estatikoaren eta ale-hazkundearen eraginez aldatzen da. Prozesu hauen zinetikak denbora-tartearen arabera ezagutzea oso garrantzitsua da iraganaldi bakoitzaren hasierako mikroegitura determinatzeko. Mikroegitura honek, tentsio/deformazio kurbaren portaeran eta dagokion mikroegituraren eboluzioan eragina izango du.

Mikroegitura-aldaketak eta berotako konformaziorako industri prozesuetan behar diren indarrak auresateko eredu matematiko bat garatzea oso erreminta ahaltsua izaten da,

prozesu horietan parte hartzen duten parametroak ulertzeko. Eredu bat garatzeko hurrengo pausoak bete behar dira:

- (1) Tentsio/deformazio portaera deskribatzen duten ekuazioak lortu, hasierako mikroegituraren eta deformazio-baldintzen arabera, hau da, tenperatura eta deformazio-abiadura.
- (2) Aldagai horien arabera, mikroegitura-aldaketak deskribatzen dituzten erlazioak lortu.
- (3) Industri lanean zehar gertatzen diren tenperatura-aldaketen ereduazapena egin.
- (4) (1), (2), eta (3) zatiek ematen duten informazioa ordenadore-eredu batean jarri.

Lan honetan aurreneko zatia (1) burutu da, Ni superraleazio baten tentsio/deformazio kurbei aplikatuz.

Isurpen-kurbak aztertzeke (tenperaturaren eta deformazio-abiaduraren arabera) proposatu den eredu, Sellars eta bere laguntzaileek austenitaren berotako deformazioa aztertzerakoan proposatutako erlazioetan /1, 2, 3/, oinarrituta dago.

Tentsio/deformazio kurba esperimentalak, tenperatura- eta deformazio-abiadura ezberdinetan egindako berotako bihurtura-saiakuntzen bidez lortu ziren. Zener-Hollomon parametroa kalkulatzeko tontor-tentsiorako lortutako aktibazio-energia erabili da. Tentsio/deformazio kurbak berregiteko, hau da, gogortze-zona, berriztatze dinamikoaren zona eta birkristaltze dinamikoaren zona berregiteko, erabilitako ekuazio desberdinak parametro horretan oinarritzen dira.

Ereduaren formulazioa

Eredua bihurtura-saiakuntzen bidez garatu dela kontutan hartuz, biraketa-angelu /bihurtura-momentu ($\theta-\Gamma$) kurbak, tentsio/deformazio ($\sigma-\varepsilon$) kurbetan transforma-

tzen dituzten erlazioak gogoratzea komeni da:

$$\varepsilon = \frac{2 \pi R \theta}{\sqrt{3} L} \quad [1]$$

$$\sigma = \frac{\sqrt{3}(3+m+n)}{2 \pi R^3} \Gamma \quad [2]$$

non:

$$n = \frac{\partial \ln \Gamma}{\partial \ln \theta}$$

$$m = \frac{\partial \ln \Gamma}{\partial \ln \dot{\theta}}$$

R probetaren erradioa eta L probetaren luzera baitira.

Zener-Hollomon parametroa hurrengo erlazioaren bidez adierazten da:

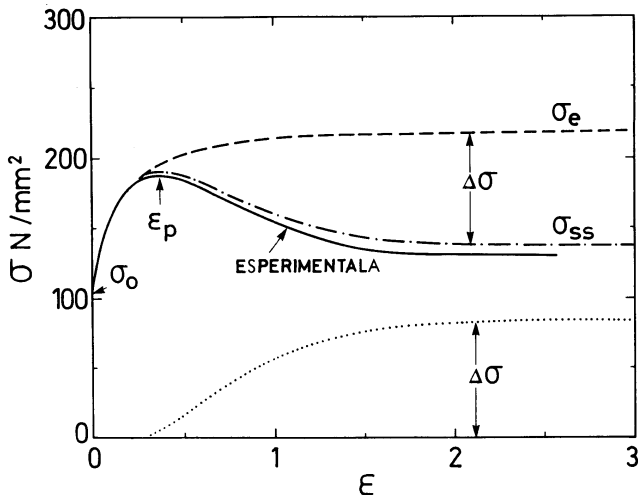
$$Z = \varepsilon \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A \left\{ \sinh(\alpha \sigma_p) \right\}^n \quad [3]$$

non:

- Q aktibazio-energia
- R gasen konstante unibertsala
- σ_p tontor-tentsioa
- $\dot{\varepsilon}$ deformazio-abiadura

A , α , n konstanteak baitira.

Berotako lanean erabilitako deformazio-abiadurretan ikusitako kurben ohizko itxura 1. irudian marra jarriaren bidez adierazitakoa izaten da. Kurbaren lehenengo zatian, gogortze-zona deritzon, tentsioa azkar igotzen da. Hazkunde hau dislokazio-dentsitatearen gehikuntzarekin eta gutxi garatu diren azpialez osatutako egitura eratzearekin erlazionaturik dago (deformaziozko gogortzearen eta berriztatze dinamikoaren arteko balantzearen emaitza). Prozesu hauek besterik egongo ez balira, deformazio handietan egoera geldikorra lortuko litzateke eta kurbaren itxura 1. irudian marra etenaren bidez adierazitakoa izango litzateke. Kurba hau era esponentzialeko adierazpen baten bidez doi daiteke /1, 2, 3/:



1. irudia. Dinamikoki birkristaltzen diren materialetan isurpen-kurbek duten ohizko itxura, ereduaren bidez kalkulaturako kurba (lerro eta puntuzko marra) eta kurba esperimentalak (marra jarraia) erakutsiz.

$$\sigma_e = \sigma_0 + B [1 - \exp(-C\varepsilon)]^m \quad [4]$$

non σ_0 , hasierako isurpen-tentsioa, B eta C Zener-Hollomon parametroaren menpeko bi konstante eta m Z-rekiko independentea den konstantea baitira. Deformazio txikietan [4], adierazpena hurrengo erako gogortze parabolikoaren ekuazio bihurtzen da:

$$\sigma_e = \sigma_0 + B (C\varepsilon)^m \quad [5]$$

Austenitaren berriztatze dinamikoa nahikoa motela dela eta, deformazio kritiko bat gainditu ondoren, metatutako energia birkristaltze dinamikoa gertatzeko nahikoa izaten da. Honek gainerako biguntzea sortzen du ($\Delta\sigma$), deformazioaren funtsean Avrami-ren motako ekuazio baten bidez deskriba daitezke:

$$\Delta\sigma = B' \left\{ 1 - \exp \left[-k \left(\frac{\varepsilon - a\varepsilon_p}{\varepsilon_p} \right)^{m'} \right] \right\} \quad [6]$$

non B' Zener-Hollomon parametroaren menpean dagoen konstantea eta k, a eta m' mate-

rial bakoitzaren konstanteak baitira. Ekuazio hau, 1. irudian puntuzko marraren irudikatzen da. [6]. ekuazioan tontor-deformazioa (ε_p) birkristaltze dinamikoaren zinetikak deskribatzeko oinarri gisa erabiltzen da, $a\varepsilon_p$ biderkadura birkristaltze dinamikoa hasteko behar den deformazio kritikoaren neurketa izanik.

[4]-[6] ekuazioetan datu esperimentaletatik konstanteak kalkulatu gero, Z parametroaren balio bakoitzari dagokion tentsio/deformazio kurba honela lor daiteke:

$$\sigma = \sigma_e \quad \varepsilon \leq a\varepsilon_p \text{ denean} \quad [7]$$

$$\sigma = \sigma_e - \Delta\sigma \quad \varepsilon \geq a\varepsilon_p \text{ denean} \quad [8]$$

Eredua aplikatuz lortutako kurba, lerro eta puntuko marraren bidez 1. irudian adierazten da.

Emaitzak eta eztabaida

Proposatutako eredua Inconel 625 superraleazioen isurpen-kurbak aztertze erabili da. Bere konposizio kimikoa 1. taulan adierazten da.

Elementua	Inconel 625
Ni	Balantzea
Cr	20-23
Fe	5 max
Al	0,4 max
Ti	0,4 max
Mo	8-10
Nb	3,15-4,15
C	0,1 max
Mn	0,5 max
Si	0,5 max
Co	1,0 max

1. taula. Superraleazioaren konposizio kimiko estandariztua (% pisutan)

Kurba esperimentalak bihurtura-saiakuntzen bidez lortu dira, saiakuntza hauetan erabilitako probetak hurrengo neurriak izanik:

- $R = 3,75$ mm probetaren erradioari dago-kionez
- $L = 17$ mm probetaren luzerari dagokionez

Aukeratutako tenperatura eta deformazio-abiaduraren balioak hauek dira:

- 950, 1000, 1050, 1100 eta 1150 °C tenperaturari dagokionez.
- 0,173, 0,52, 1,68 eta 5,33 s⁻¹ deformazio-abiadurari dagokionez.

Nahiz eta isurpen-kurbaren ohizko itxura 1. irudian marra jarraian adierazitakoa izan, lan honetan tentsioaren asetasuna bi deformazio-abiadura txikienetan besterik ez da ikusten, gainerako kurbetan tentsioa hausturaraino eroriz egiten delarik. Tentsio-erorketa hau, bihurtura-saiakuntza zehar gertatutako berokuntza adiabatikoaren ondorioa da. Horregatik gainerako biguntzea ($\Delta\sigma$) kalkulatzeko, 0,173

s⁻¹ eta 0,52 s⁻¹ deformazio-abiadura txikienei dagozkien kurbak bakarrik hartu dira kontutan, hau da, egoera geldikorra garbi agertzen duten kurbak.

Ereduaren ekuazioetan azaltzen den zenbait koefiziente Zener-Hollomon parametroaren menpean dago ($Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT)$), Q tontor-tentsiorako kalkulaturako aktibazio-energia hartuz ($Q = 402$ kJ/mol).

Erregresioaren bidez erreduaren parametro guztiak kalkulatu dira, 2. taulan adierazitako ekuazioak lortuz. Irudietan parametro bakoitzerako lortutako doitasuna ikus daiteke. 2. irudian, Zener-Hollomon parametroaren aldaketa eta 3. irudian B koefizientea Z-aren arabera, erakusten dira. m konstantearentzat lortutako balioa, (m = 0,6), beste superraleazioentzat lortutakoarekin konparagarria da (Incoloy 800H /4/, Incoloy 825 /5/). Balio hau ere, beste lanetan antzeko ereduak aplikatuz C/Mn-altzairuentzat lortutakoetan tartetan dago /3, 6/. C koefizientari dagokionez, autore batzuek C eta Z-ren artean erlazio lineal bat proposatzen dute (eskala bilogaritmiko batean) /3, 6, 7/. Baina, lan honetan C

$$Z = \epsilon \exp\left(\frac{402000}{RT}\right) = 2,61 \times 10^{15} \left\{ \sinh(0,0036 \sigma_p) \right\}^{4,3} \quad \text{[II.a]}$$

$$R = 8,318 \text{ J.mol}^{-1} . \text{K}^{-1}$$

$$\sigma_e = \sigma_o + B \left[1 - \exp(-C\epsilon) \right]^{0,6} \quad \epsilon \leq a\epsilon_p \quad a = 0,8 \text{ izanik} \quad \text{[II.b]}$$

$$B = 0,0174 Z^{0,228} \quad \text{[II.c]}$$

$$C = 0,011 \epsilon^{-0,317} Z^{0,135} \quad \text{[II.d]}$$

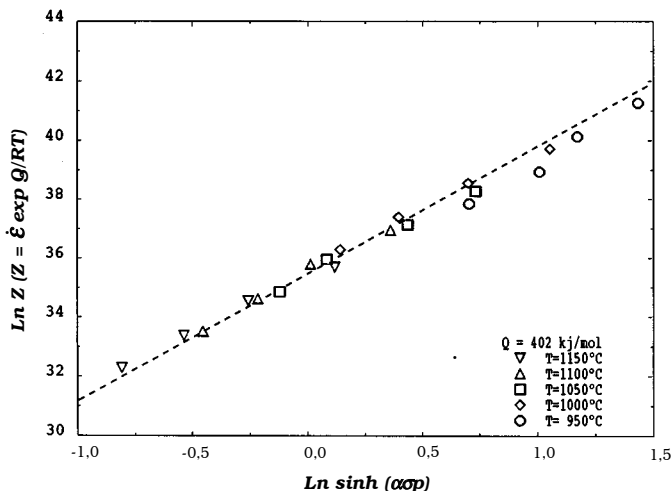
$$\sigma = \sigma_e - \Delta\sigma \quad \epsilon \geq a\epsilon_p$$

$$\Delta\sigma = B' \left\{ 1 - \exp \left[-0,25 \left(\frac{\epsilon - 0,8 \epsilon_p}{\epsilon_p} \right)^{1,2} \right] \right\} \quad \text{[II.e]}$$

$$B' = 7,24 \times 10^{-3} Z^{0,274} \quad \text{[II.f]}$$

$$\epsilon_p = 2,45 \times 10^{-3} Z^{0,125} \quad \text{[II.g]}$$

2. taula. Lortutako erreduaren parametro eta ekuazioak.



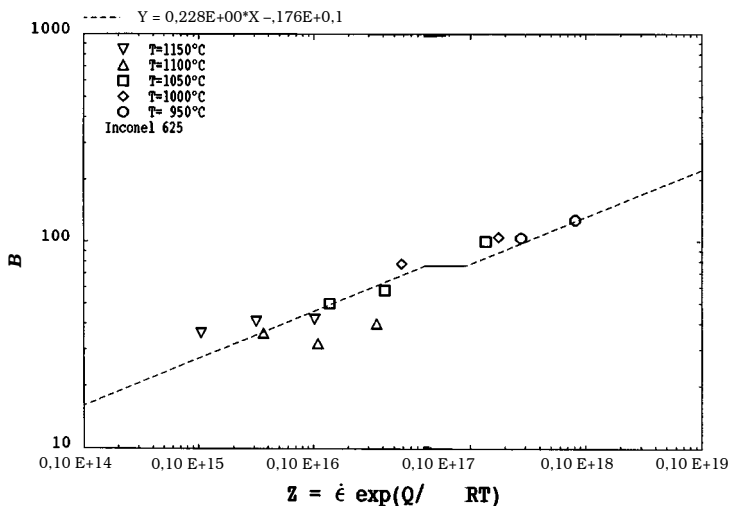
2. irudia. Zener-Hollomon parametroa.

koefizientea versus Z irudikatzean, deformazio-abiadurarekiko eta temperaturarekiko menpekotasuna desberdina dela ikusi da. Deformazio-abiadura konstantean, temperatura handiagotzen denean, C handiagotu egiten da eta temperatura konstantean, deformazio-abiadura handiagotzen denean, C txikiagotu egiten da. Horrela, 4. irudian, deformazio-abiaduraren eragina zuzendu ondoren, $(C\dot{\epsilon}^{+0,317})$ versus Z irudikatzen da, [II.d.] erlazioa lortuz. $\Delta\sigma$ funtzioari dagokionez, 5. irudian B' koefizientea eta 6. irudian ϵ_p Z -ren

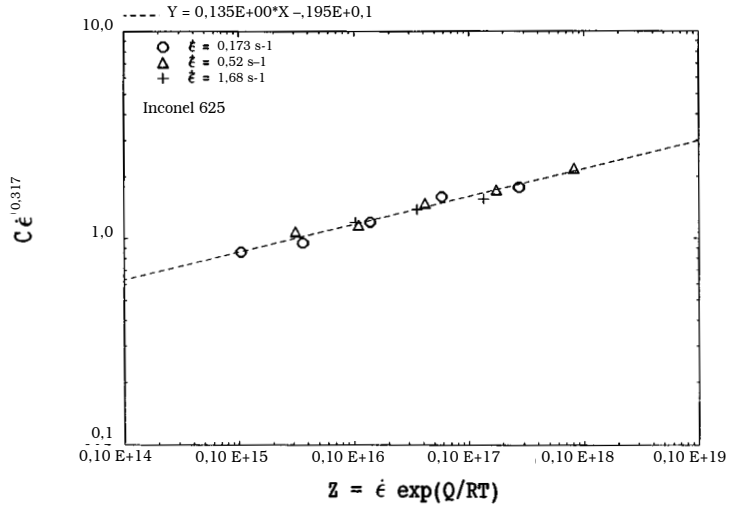
arabera ikus daitezke. Normalean, ale-tamainak tontor-deformazioan eragina izaten du eta bere efektua [II.g.] erlazioan $(\epsilon_p d_0^9)$, kontuan izan beharko da. $m' = 1,2$ lortutako konstantea, nikeltzat /2, 8/ eta altzairu herdoilgaitzarentzat /9/ birkristaltze dinamikoan lortutako Avrami koefizienteekin bat dator.

Koefiziente desberdinak Z -rekiko dituzten erlazioak eta independente diren konstante guztiak ezagutuz gero, Z -ren balio bakoitzarentzat tentsio/deformazio kurba kalkula dai-

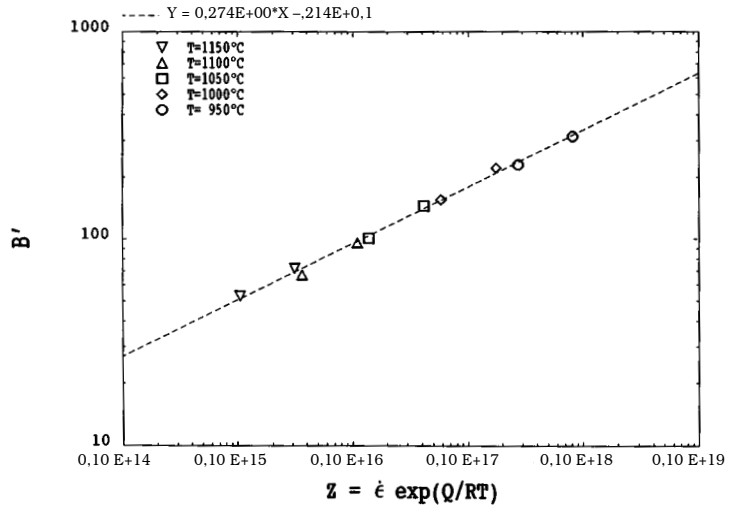
3. irudia. B koefizientearen aldaketa Zener-Hollomon (Z) parametroaren arabera.



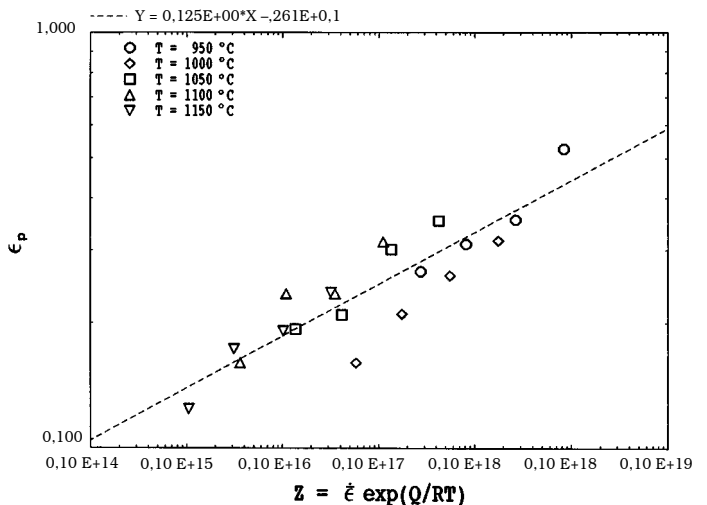
4. irudia. C koefizientea-
ren aldaketa Zener-Hollo-
mon (Z) parametroaren
arabera
(deformazio-abiaduraren
eragina zuzendu ondoren).

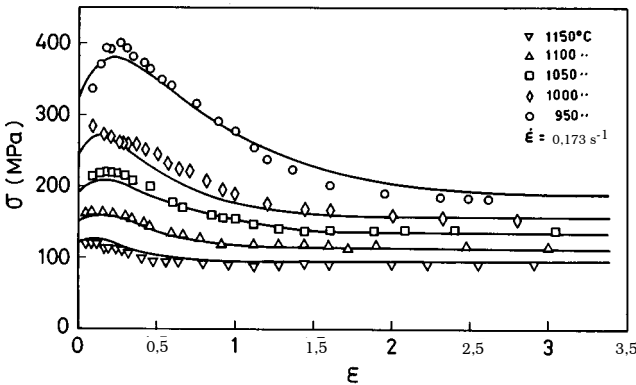


5. irudia.
B' koefizientearen alda-
keta Zener-Hollomon (Z)
parametroaren arabera.



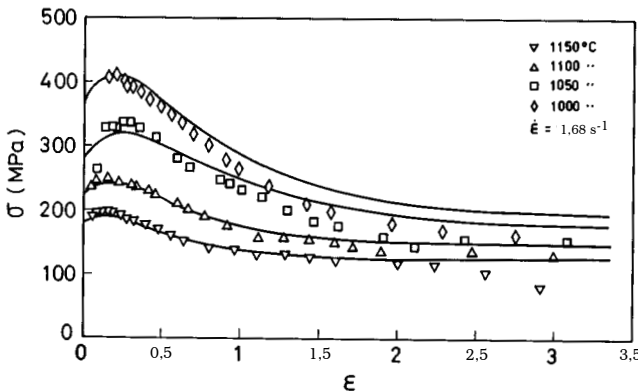
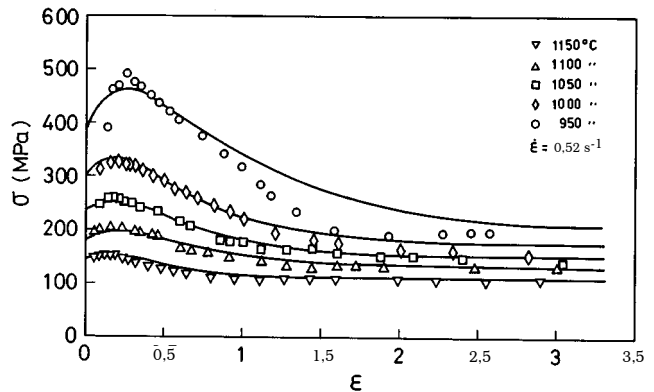
6. irudia. ϵ_p tontor-
deformazioaren aldaketa
Zener-Hollomon (Z)
parametroaren arabera.





7. irudia. $\dot{\epsilon} = 0,173 \text{ s}^{-1}$
deformazio-abiadurari eta 950, 1000, 1050, 1100 eta 1150 °C-ko temperaturei dagozkien tentsio/deformazio kurba esperimentalak (ikurrez) eta kalkulaturakoak (marra jarraia).

8. irudia. $\dot{\epsilon} = 0,52 \text{ s}^{-1}$
deformazio-abiadurari eta 950, 1000, 1050, 1100 eta 1150 °C-ko temperaturei dagozkien tentsio/deformazio kurba esperimentalak (ikurrez) eta kalkulaturakoak (marra jarraia).



9. irudia. $\dot{\epsilon} = 1,68 \text{ s}^{-1}$
deformazio-abiadurari eta 950, 1000, 1050, 1100 eta 1150 °C-ko temperaturei dagozkien tentsio/deformazio kurba esperimentalak (ikurrez) eta kalkulaturakoak (marra jarraia).

teke 7., 8. eta 9. irudietan kurba esperimentalak (ikurrez) eta kalkulaturako kurbak (marra jarraian) erakusten dira. Irudietan ikusten denez, doitasuna onargarria da, desbideratze handienak tenperatura txikienetan eta deformazio-abiadura handienetan daudelarik.

Eredua, ijezketa industrialari aplikatzen zaionean, iraganaldien artean izaten den birkristaltze estatikoa kontutan hartu behar da, kurbaren hasierako tentsioan duen eragina jakinik. Horren ondorioz eredua zuzendu egin behar da deformazio osagarri bat gehituz.

Deformazio hau hurrengo ekuazioaren bidez kalkulatu da:

$$\sigma_{\varepsilon} = \sigma_i - (\sigma_i - \sigma_{i0}) X_a \quad [9]$$

non:

σ_{ε} = birkarga-tentsioa

σ_i = aurreneko iraganaldian zegoen kargaren azkeneko balioa

σ_{i0} = 0,02 deformazioari dagokion tentsioa

X_a = biguntze estatikoaren frakzioa diren.

ε' kalkulatzeko, σ_{ε} , $(\sigma - \Delta\sigma)$ funtzioan ordezkatuko da, eta horrela kurba berria adieraziko duen funtzioa hurrengo izango da: $(\sigma - \Delta\sigma) (\varepsilon + \varepsilon_0)$.

Iraganaldien arteko egoera deskribatzeko birkristaltze estatikoaren eta ale-tamainaren hazkundearen eredu desberdinak garatu dira, Sellars eta bere laguntzaileak garatutakoa garrantzitsuenetarikoa bat izanik /1, 10, 11/. Ijezketan aplikatu behar diren indarrak kalkulatzeko teoria desberdinak daude, erabilienetarikoa bat Sims-en formula izanik /12/:

$$P = W \sqrt{R\Delta h} \bar{\sigma} Q \quad [10]$$

non:

W produktuaren zabalera

R arrabolaren erradioa

Δh irterako eta sarrerako produktuen arteko altuera-diferentzia

$$\bar{\sigma} = \frac{2}{\sqrt{3}\varepsilon_i} \int_0^{\varepsilon_i} (\sigma - \Delta\sigma) d\varepsilon$$

konpresio launeko batezbesteko erresistentziaren balioa (ε_i i iraganaldiko deformazioa izanik)

Q zuzenketa-faktore bat baitira.

Ondorioak

- 1.- Ereduen bidez tentsio/deformazio kurba osoa berregin daiteke, hau da, gogortze-zona, berriztatze dinamikoaren zona eta birkristaltze dinamikoaren zona.
- 2.- Ereduen funtzio guztiak parametro bakar baten menpean daude.
- 3.- Ereduen adierazpen matematikoa nahikoa erraza da. Konpresio launeko batezbesteko erresistentziaren balioa ijezketan iraganaldi bakoitzean analitikoki kalkulatu daiteke.
- 4.- Eredua ijezketan indarrak kalkulatzeko erabil daiteke, behar diren beste ekuazioak kontutan hartuz (birkristaltze estatikoa, ale-tamainaren hazkundera, tenperatura-aldaketak...).

Bibliografia

- 1.- Sellars, C.M.; "The kinetics of softening processes during hot working of austenite" Czech. J.Phys., B35, (1985), 239.
- 2.- Sah, J.P., Richardson, G.J. and Sellars, C.M.; J. Australian Inst. Metals, 14 (1969), 292.
- 3.- Leduc, L.; Ph. D. Thesis, University of Sheffield (1980).
- 4.- Semper, I.; "Incoloy 800H Aleazioak berotan duen jokaera mekanikoaren ikasketa"; Ikasketa bukaerako proiektua (1992).
- 5.- Guraya, T.; Ph. D. Thesis in course.
- 6.- Maruques Barbosa, R.A.N. and Costa Braga, H.; "Modelling of the stress-strain curve and the occurrence of dynamic recrystallization in hot rolling of steels", Recrystallization 92, M. Fuentes, J. Gil Sevillano ed., 169-175.
- 7.- Medina, S. F. and Hernandez, C.A.; Mémoires et Etudes Scientifiques Revue de Métallurgie, Avril 1992, 218-223.
- 8.- Sellars, C.M.; Metalurgia I Odlewnictwo, 3, (1979), 376.
- 9.- Roberts, W., BodÈn, H. and Ahlblom, B.; Met.Sci., 13, 195, (1979).
- 10.- Sellars, C. M.; Mater. Sci. Technol., 1985, vol. 1, pp. 352.
- 11.- Sellars, C. M. and Whiteman, J.A.; Met.Sci. 1979, mar-apr. 187-94. orr.
- 12.- Sims, Proc. Inst. Mech. Eng., 168, 191-200 (1954).