Diseño y caracterización de esponjas pseudoelásticas

Prado, Lucia H.

26/07/2017

Instituto Sabato

División Física de Metales - Centro Atómico Bariloche

Índice

Introducción

Motivación

Transformación martensítica

- En estado sólido
- Sin difusión
- De primer orden

Formas de transformación:

- Por temperatura (M_s y M_f)
- Por tensiones (Strain Induced Martensite)

Transformación martensítica

- En estado sólido
- Sin difusión
- De primer orden

Formas de transformación:

- Por temperatura (M_s y M_f)
- Por tensiones (Strain Induced Martensite)

I: Deformación elástica de la β

II: Formación y crecimiento de placas de martensita

III: Deformación elástica de la martensita

I: Deformación elástica de la β

II: Formación y crecimiento de placas de martensita

III: Deformación elástica de la martensita

I: Deformación elástica de la β

II: Formación y crecimiento de placas de martensita

III: Deformación elástica de la martensita

Monocristales y Policristales

$$\tau_R = \sigma cos(\lambda) cos(\phi)$$

λ : Ángulo entre tensión aplicada y dirección de deslizamiento

ϕ : Ángulo entre tensión aplicada y la normal al plano de transformación

Pseudoplasticidad

$$\frac{d\tau_R}{dT} = \frac{\Delta S}{\Delta V}$$

- $\tau_R = \sigma cos(\lambda) cos(\phi)$
- ΔS: variación de entropía
- ΔV: variación de volumen
- ΔT: variación de temperatura

T<Mf
Martensita
autoacomodada
T>Af
Enfriamiento
Austenita
β
Calentamiento
Deformación
ε
T<Mf
σ
σ

[Cu] / % pp.
100
80
60
40
20
0
1200
1000
800
600
400
200
T / °C
1085°C
903°C
835°C
700°C
598°C
558°C
420°C
Liq
β
γ
δ
(Cu)
α
β'
ε
(Zn)
η
0
20
40
60
80
100
[Zn] / % pp

$$\frac{e}{a} = 1 + C_{Zn} + 2C_{Al}$$

$$M_s[K] = 2686 - 6400C_{Zn} - 9000C$$

$$C_{Cu} + C_{Zn} + C_{Al} = 1$$

Esponjas metálicas

- Deformación elástica
- Colapso de la estructura
- Densificación

Deformación en bandas a 45°

Esponjas metálicas

- Deformación elástica
- Colapso de la estructura
- Densificación

Deformación en bandas a 45°

Esponjas metálicas

- Deformación elástica
- Colapso de la estructura
- Densificación

Deformación en bandas a 45°

Esponjas pseudoelásticas

- Gran capacidad de deformación
- Recuperación de la forma inicial
- Disipación de energía por el efecto pseudoelástico

Esponjas pseudoelásticas

- Gran capacidad de deformación
- Recuperación de la forma inicial
- Disipación de energía por el efecto pseudoelástico

Esponjas pseudoelásticas

- Gran capacidad de deformación
- Recuperación de la forma inicial
- Disipación de energía por el efecto pseudoelástico

200 µm
200 µm
200 µm
200 µm

Preparación de la aleación

- Cu: 50 % ácido nítrico (al 65 %) - 50 % agua
- Zn: 60 % ácido nítrico (al 65 %) - 40 % agua
- Al: 60 % agua - 30 % ácido clorhídrico (al 37 %) - 10 % ácido fluorhídrico (al 48 %)

Medición de la M_s

Índice

Introducción

Motivación

motivación

Tamaño de grano

Resistencia

Índice

Introducción

Motivación

Disminución tamaño de grano

Muestra	$Cu - Zn - Al(g)$	$\%pp\ AlB_2$	Método	Horno
Botón 1	18,866	0,005	I	Inducción
Botón 2	18,564	0,5	I	Resistivo
Botón 3	14,129	0,5	II	Resistivo
Botón 4	18,383	0,5	II	Resistivo

Método I: Aleación $+$ AlB_2 papel aluminio $+$ Cu

Método II: Aleación $+$ AlB_2 $\rightarrow$ prensado de pastillas

Disminución tamaño de grano

Muestra	$Cu - Zn - Al(g)$	$\%pp\ AlB_2$	Método	Horno
Botón 1	18,866	0,005	I	Inducción
Botón 2	18,564	0,5	I	Resistivo
Botón 3	14,129	0,5	II	Resistivo
Botón 4	18,383	0,5	II	Resistivo

Método I: Aleación $+$ AlB_2 papel aluminio $+$ Cu

Método II: Aleación $+$ AlB_2 $\rightarrow$ prensado de pastillas

Disminución tamaño de grano

Muestra	$Cu - Zn - Al(g)$	$\%pp\ AlB_2$	Método	Horno
Botón 1	18,866	0,005	I	Inducción
Botón 2	18,564	0,5	I	Resistivo
Botón 3	14,129	0,5	II	Resistivo
Botón 4	18,383	0,5	II	Resistivo

Método I: Aleación $+$ AlB_2 papel aluminio $+$ Cu

Método II: Aleación $+$ AlB_2 $\rightarrow$ prensado de pastillas

Disminución tamaño de grano

Muestra	$Cu - Zn - Al(g)$	$\%pp\ AlB_2$	Método	Horno
Botón 1	18,866	0,005	I	Inducción
Botón 2	18,564	0,5	I	Resistivo
Botón 3	14,129	0,5	II	Resistivo
Botón 4	18,383	0,5	II	Resistivo

Método I: Aleación $+$ AlB_2 papel aluminio $+$ Cu

Método II: Aleación $+$ AlB_2 $\rightarrow$ prensado de pastillas

botón y pastillas

spot
2.0
HV
15.0 kV
WD
10.6 mm
mag
200 x
det
ETD
HFW
1.49 mm
500 µm
Nova NanoSEM

spot
2.0
HV
15.0 kV
WD
10.3 mm
mag
2 000 x
det
ETD
HFW
149 µm
50 µm
Nova NanoSEM

Disminución tamaño de grano

Muestra	$Cu - Zn - Al(g)$	$\%pp\ AlB_2$	Método	Horno
Clavo 1	8	0,5	III	Resistivo
Clavo 2	8	0,05	III	Resistivo
Clavo 3	8	-	IV	Resistivo
Clavo 4	8	0,005	IV	Resistivo

Método III: Aleación $+$ AlB_2 papel aluminio $+$ Cu

Método IV: Aleación $+$ AlB_2 $\rightarrow$ prensado de pastillas

Disminución tamaño de grano

Muestra	$Cu - Zn - Al(g)$	$\%pp\ AlB_2$	Método	Horno
Clavo 1	8	0,5	III	Resistivo
Clavo 2	8	0,05	III	Resistivo
Clavo 3	8	-	IV	Resistivo
Clavo 4	8	0,005	IV	Resistivo

Método III: Aleación $+$ AlB_2 papel aluminio $+$ Cu

Método IV: Aleación $+$ AlB_2 $\rightarrow$ prensado de pastillas

Disminución tamaño de grano

Muestra	$Cu - Zn - Al(g)$	$\%pp\ AlB_2$	Método	Horno
Clavo 1	8	0,5	III	Resistivo
Clavo 2	8	0,05	III	Resistivo
Clavo 3	8	-	IV	Resistivo
Clavo 4	8	0,005	IV	Resistivo

Método III: Aleación $+$ AlB_2 papel aluminio $+$ Cu

Método IV: Aleación $+$ AlB_2 $\rightarrow$ prensado de pastillas

Disminución tamaño de grano

Muestra	$Cu - Zn - Al(g)$	$\%pp\ AlB_2$	Método	Horno
Clavo 1	8	0,5	III	Resistivo
Clavo 2	8	0,05	III	Resistivo
Clavo 3	8	-	IV	Resistivo
Clavo 4	8	0,005	IV	Resistivo

étodo III: Aleación $+$ AlB_2 papel aluminio $+$ Cu

étodo IV: Aleación $+$ AlB_2 $\rightarrow$ prensado de pastillas

500 µm

HV 20.00 kV
WD 10.3 mm
mag 100 x
det vCD
HFW 2.98 mm
spot 7.0
4/12/2017 2:07:06 PM
500 µm
CNEA CAB

HV 20.00 kV
WD 10.3 mm
mag 200 x
det vCD
HFW 1.49 mm
spot 7.0
4/12/2017 2:49:34 PM
400 µm
CNEA CAB

Muestra	$wt\,\%AlB_2$	Método de fabricación	$\bar{tg}(mm)$	σ
Clavo 5	-	-	0.59	0.30
Botón 1	0,005	I	0.31	0.22
Clavo 1	0,50	III	0.16	0.08
Clavo 2	0,05	III	0.10	0.05
Clavo 3	-	IV	0.11	0.05
Clavo 4	0,005	IV	0.07	0.03

Clavo 3
Clavo 4
Clavo 5
Tensión (MPa)
500
400
300
200
100
0
0
−1
−2
−3
−4
−5
ε (%)

A

Índice

Introducción

Motivación

Introducción

Metodo cuatro puntas

$$V^+ = V_A + I^+.R - V_B$$

$$V^- = V_A + I^-.R - V_B$$

$$V^+ - V^- = [I^+ + I^-]R \longrightarrow R = \frac{V^+ - V^-}{(I^+ + I^-)}$$

$$\rho = R.\frac{A}{l}$$

Descripción histéresis

$$R_0 = \rho \frac{l_0}{A_0} \tag{1}$$

donde R_0 (Ω) es la resistencia inicial, ρ (Ωm) es la resistividad, l_0 es el largo inicial y A_0 la sección inicial.

$$l = l_0 * (1 + \varepsilon) \qquad y \qquad A = \frac{A_0}{(1 + \varepsilon)}$$

Por lo tanto,

$$R = \rho \frac{l}{A} = \rho (1 + \varepsilon)^2 \frac{l_0}{A_0} = (1 + \varepsilon)^2 R_0 \tag{2}$$

De esta manera, $(1 + \varepsilon)^2$ es un factor que relaciona el cambio de la resistencia con los cambios geométricos de la muestra.

$$\rho_M = f\rho_A$$
$$R_M^0 = fR_A$$

En este caso se está tomando en cuenta la compresión que sufre la muestra al transformar, que generará una disminución en la resistencia, y entonces llegará al valor R_M. Por lo tanto tendremos:

$$R_M = f' R_A$$

donde f' es el factor que relaciona las resistencias en un experimento real. Como $R_M = R_M^0(1+\varepsilon)^2 = f' R_A$ se llega a:

$$R_M^0(1+\varepsilon)^2 = f' R_A$$
$$f' = f(1+\varepsilon)^2$$

Esta ecuación relaciona los valores de resistencia al transformar, tomando en cuenta los cambios geométricos en la muestra.

RM
RA
1
2
3
4
0.055
0.050
0.045
R (mΩ)
−40
−20
0
20
40
60
T (°C)

0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
ε (%)
0
500
1,000
1,500
Tiempo (s)

Tensión (*MPa*)	ε (%)	$f' = \dfrac{R_M}{R_A}$
0	0.76	1.27
1.93	0.37	1.28
17.4	-7.60	1.15
31.0	-7.90	1.17
46.5	-8.00	1.17
Referencia	8.00	1.73

Cuadro 1: Monocristal

Tensión (Mpa)	ε (%)	$f' = \dfrac{R_M}{R_A}$
0	-0.10	1.30
0	-0.60	1.27
0	-0.50	1.28
2.04	-0.90	1.27
18.4	-1.60	1.24
32.7	-2.60	1.21
49.1	-2.50	1.23

Cuadro 2: Policristal

0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
R (mΩ)
−40
−30
−20
−10
0
10
20
30
T (°C)
R_1^M
R_0^M
R_2^A
R_1^A
R_0^A

Al concluir un ciclo de transformación a martensita y volver a austenita, la resistencia estará dada por:

$$R_i^A = \rho^A \frac{L_0}{A_i}(1 - b_i) + \rho^M \frac{L_0}{A_i} b_i = \rho^A \frac{L_0}{A_i}[1 + b_i(f - 1)] \qquad (3)$$

Donde ahora $0 < b_i < 1$ representa la fracción de martensita retenida luego de ese ciclo de transformación y $(1 - b_i)$ la aleación restante que transforma a austenita. En este punto, la resistencia estará dada por la austenita, martensita retenida, y además por la rotura de la estructura. Por ejemplo luego del primer ciclo de transformación será R_1^A en la figura. Si en el estado inicial la esponja esta compuesta solo por austenita y no presenta ninguna rotura su resistencia estará dada por:

$$R_0^A = \rho^A \frac{L_0}{A_0} \qquad (4)$$

Por lo tanto en el ciclo i de transformación la resistencia en estado austenítico será:

$$R_i^A = R_0^A \frac{A_0}{A_i}[1 + b_i(f - 1)] = R_0^A a_i[1 + b_i(f - 1)] \tag{5}$$

Si ahora comparamos le resistencia inicial en estado austenítico R_0^A con la resistencia en estado martensítico luego del ciclo i de transformación obtendremos:

$$R_i^M = \rho^M \frac{L_0}{A_i} \tag{6}$$

Si el parámetro f relaciona las resistividades en estado austenítico y martensítico, entonces:

$$f = \rho^M / \rho^A \longrightarrow R_i^M = f R_0^A \frac{A_0}{A_i} = R_0^A a_i f \tag{7}$$

Esponja	Ensayo	R^M	R^A	A_0 / A
1	1	0.040	0.031	1.009
1	2	0.046	0.034	1.061
1	3	0.058	0.042	1.067
1	4	0.089	0.068	1.010
2	1	0.015	0.011	0.992
2	2	0.017	0.013	1.007

Esponja	Ensayo	R^M	R^A	b
1	1	0.031	0.031	0.033
1	2	0.035	0.034	0.139
1	3	0.044	0.042	0.166
1	4	0.069	0.068	0.044
2	1	0.011	0.011	0.029
2	2	0.013	0.012	0.054

Conclusiones