

Capítulo 4

Difusión

1.4. Difusión en Sólidos

1.4.1. Difusión en Estado Estacionario

Tabla 11 Coeficientes de Difusión, Energías de Activación y Puntos de Fusión para auto-difusión

Species	D_0 (cm ² /s)	E_a (KJ/mol)	T_m (°C)
Pb	6.6	117	327
Zn (to c axis)	0.046	85	419
Zn (⊥ to c axis)	91	130	419
Ag	0.89	192	962
Au	0.16	222	1064
Cu	11	239	1085
Ni	—	293	1455
Co	0.31	280	1494
α-Fe	2300	306	1538
γ-Fe	5.8	310	—
Pt	0.048	233	1772

$$J_{Ay}^* = -D_{AB} \frac{dc_A}{dy}$$

1ra ley de Fick

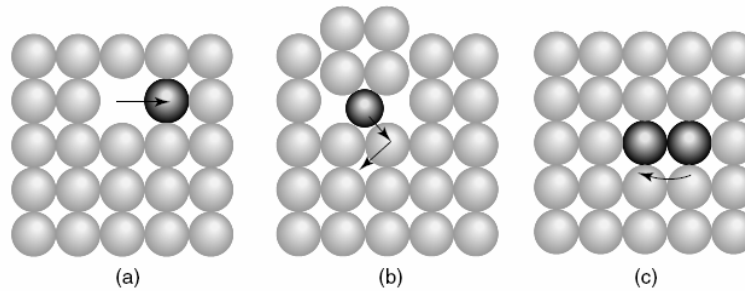


Figura 41 Mecanismos de difusión en materiales (a) por vacancia, (b) intersticial y (c) de intercambio

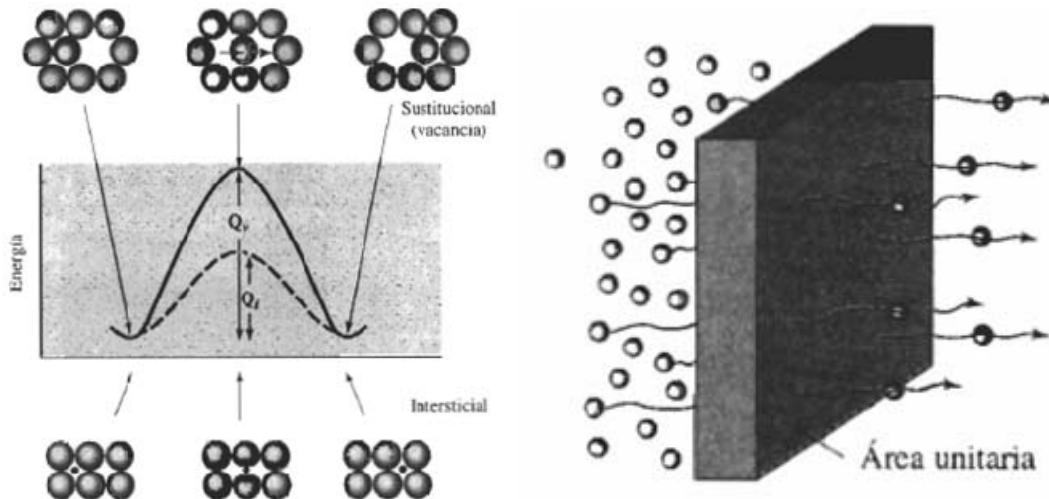


Figura 42 Izq. Energía de activación en difusión por vacancia e intersticial. Der. El flujo durante la difusión queda definido como el número de átomos que pasa a través de un plano de área unitaria por unidad de tiempo

Tabla 12 Energía de activación y difusividad de átomos en materiales seleccionados.

Par de difusión	Q (cal/mol)	D ₀ (cm ² /s)
Difusión intersticial:		
C en hierro CCC	32,900	0.23
C en hierro CC	20,900	0.011
N en hierro CCC	34,600	0.0034
N en hierro CC	18,300	0.0047
H en hierro CCC	10,300	0.0063
H en hierro CC	3,600	0.0012
Autodifusión (difusión por vacancias):		
Pb en Pb CCC	25,900	1.27
Al en Al CCC	32,200	0.10
Cu en Cu CCC	49,300	0.36
Fe en Fe CCC	66,700	0.65
Zn en Zn HC	21,800	0.1
Mg en Mg HC	32,200	1.0
Fe en Fe CC	58,900	4.1
W en W CC	143,300	1.88
Si en Si (covalente)	110,000	1800.0
C en C (covalente)	163,000	5.0
Difusión heterogénea (difusión por vacancias):		
Ni en Cu	57,900	2.3
Cu en Ni	61,500	0.65
Zn en Cu	43,900	0.78
Ni en hierro CCC	64,000	4.1
Au en Ag	45,500	0.26
Ag en Au	40,200	0.072
Al en Cu	39,500	0.045
Al en Al ₂ O ₃	114,000	28.0
O en Al ₂ O ₃	152,000	1900.0
Mg en MgO	79,000	0.249
O en MgO	82,100	0.000043

De diversas fuentes, incluyendo Y. Adda y J. Philibert, *La Diffusion dans les Solides*, Vol. 2, 1966.

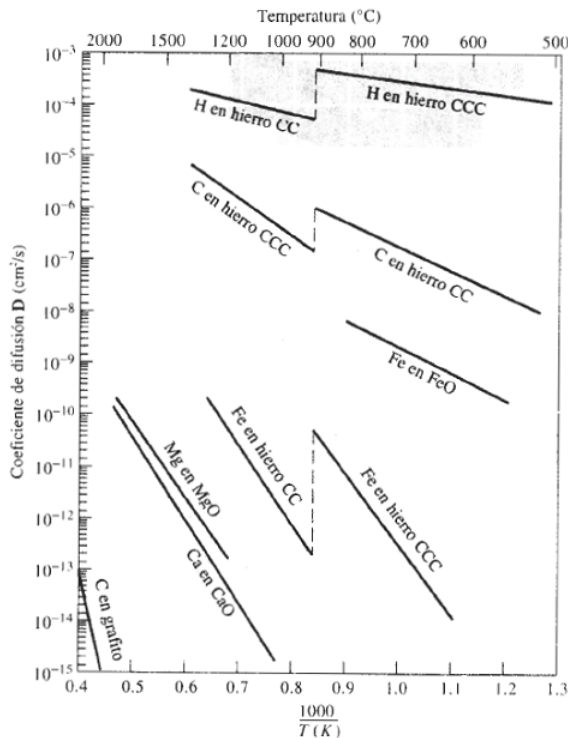


Figura 43 Coeficiente de difusión D en función del recíproco de la temperatura para varios metales y materiales cerámicos. En esta grafica de Arrhenius, D representa la rapidez del proceso de difusión. Una pendiente pronunciada significa una energía de activación elevada

1.4.2. Difusión en Estado no Estacionario – 2da ley de Fick

La **segunda ley de Fick**, que describe el estado dinámico de la difusión de los átomos, es la ecuación diferencial $d^2c/dx^2 = d^2c/dx^2$, cuya solución depende de las condiciones a la frontera para una situación en particular. Una solución de esta ecuación es:

$$\frac{c_x - c_s}{c_s - c_0} = \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right), \tag{5-5}$$

donde c_s es la concentración constante de los átomos a difundir en la superficie del material, c_0 es la concentración inicial en el material de los átomos a difundir y c_x es la concentración del átomo en difusión en una posición x por debajo de la superficie después de un tiempo t .

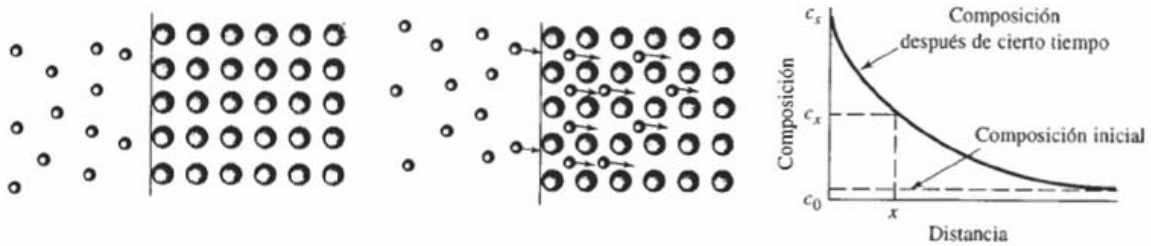


Figura 44 Difusión de átomos en la superficie de un material ilustrando la 2da ley de Fick

$\frac{x}{2\sqrt{Dt}}$	$\text{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$
0	0
0.10	0.1125
0.20	0.2227
0.30	0.3286
0.40	0.4284
0.50	0.5205
0.60	0.6039
0.70	0.6778
0.80	0.7421
0.90	0.7970
1.00	0.8427
1.50	0.9661
2.00	0.9953

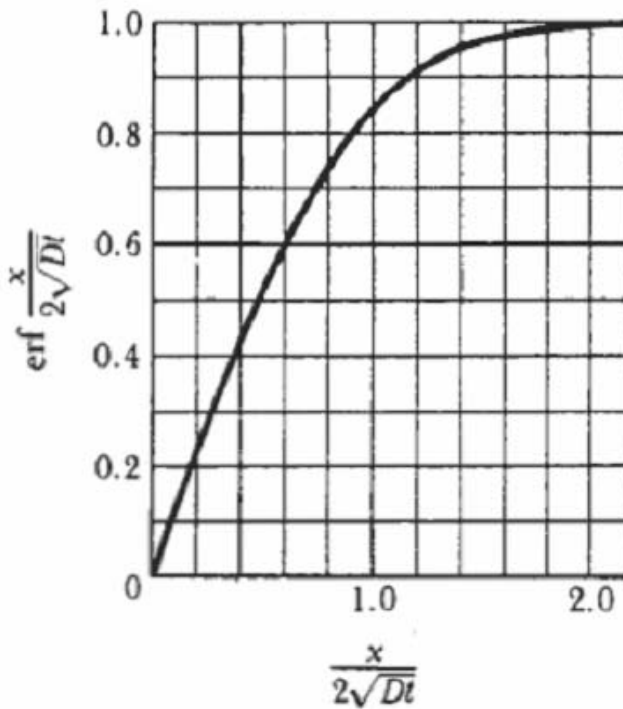


Figura 45 Función de error correspondiente a la 2da ley de Fick

1.4.3. Difusión y procesamiento de materiales

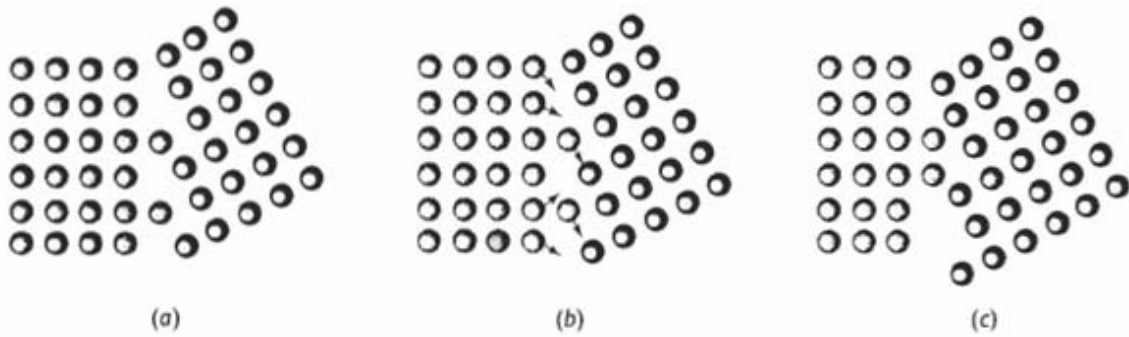


Figura 46 Difusión de átomos en los límites de grano: El crecimiento de grano ocurrirá cuando los átomos difundan de un borde de grano de un grano a otro

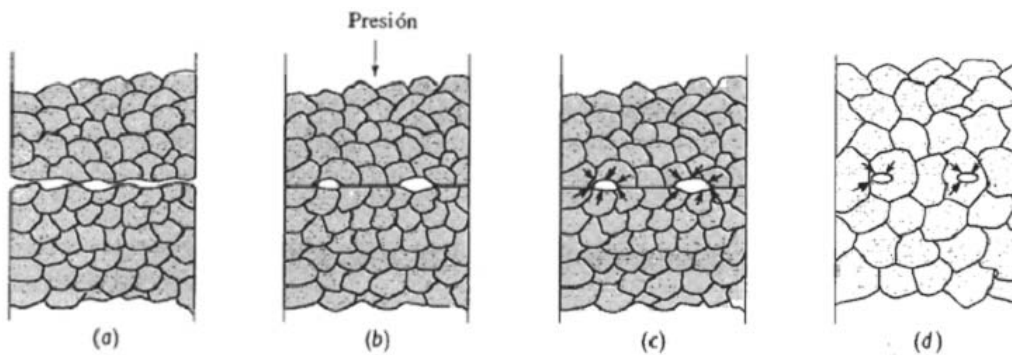


Figura 47 Pasos en la soldadura por difusión: (a) inicialmente el área de contacto es pequeña; (b) la aplicación de presión deforma la superficie, incrementando el área de unión; (c) la difusión por bordes de grano da como resultado la contracción de los huecos y (d) la eliminación final de los huecos requiere de la difusión volumétrica.

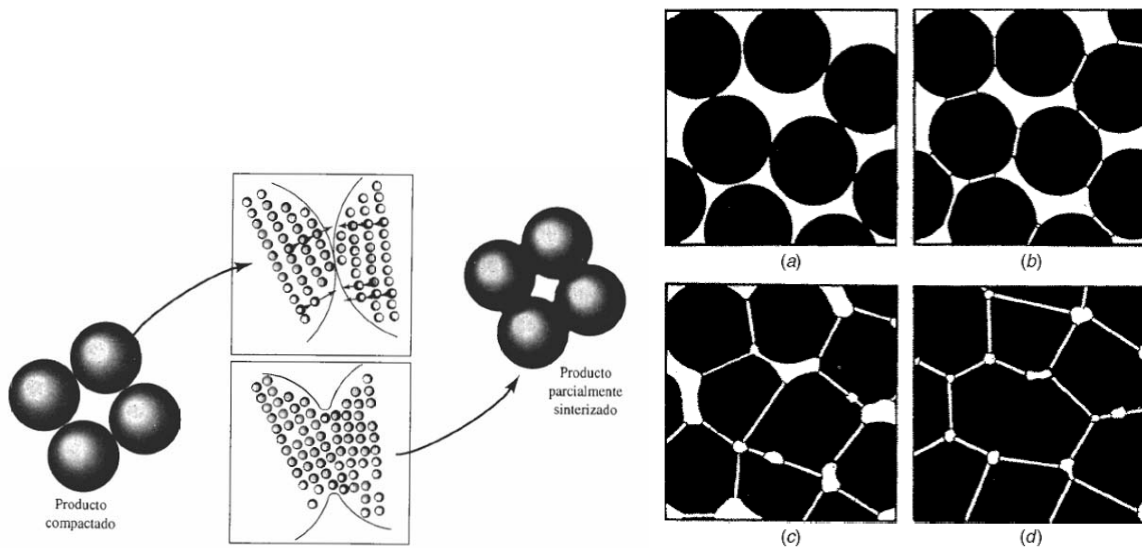


Figura 48 Izq. Proceso de difusión durante el sinterizado y la metalurgia de polvos los átomos se difunden hacia los puntos de contacto, creando puentes y reduciendo el tamaño de los poros. **Der.** Desarrollo de la microestructura de una cerámica a través de sinterizado. (a) Partículas solidas sueltas (b) Etapa inicial (c) Etapa intermedia (d) Etapa final