

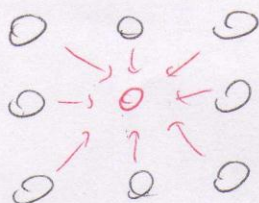
P11

a) Cu-2Be(A), Cu-2Al(B), Cu-8Al(C) ~ en peso!

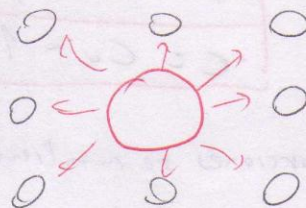
* ¿Cómo cuantificar la contribución a la resistencia mecánica de una aleación por parte de un soluto?

↳ Cualquier soluto aumenta las props. mecánicas de una aleación, debido a que generan tensiones y distorsiones en la red cristalina que obstaculizan el paso de las dislocaciones.

↳ Un soluto cuyo radio sea menor que el radio de la matriz, aumentará la resistencia mecánica de la aleación en mayor medida que un soluto cuyo radio sea mayor que el de la matriz.



(i) $R_{sol} < R_{mat}$



(ii) $R_{sol} > R_{mat}$

Resistencia mecánica (i) > Resistencia mecánica (ii)

↳ A mayor concentración de soluto, mayor resistencia mecánica tendrá la matriz.

* Teniendo en cuenta esto, primero debemos transformar los % a porcentaje atómico, para asegurarnos de las proporciones. Tomando como base 1 gr de aleación:

A)

$$M_{Cu} = 0,98 \cdot 1 = 0,98 \text{ gr} \Rightarrow \text{Átomos de Cu} = \frac{0,98 \text{ (gr)}}{63,54 \text{ (gr/mol)}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \left[\frac{\text{át}}{\text{mol}} \right]$$

$$\therefore \text{Átomos de Cu} = 9,285 \cdot 10^{21} \text{ [át]}$$

$$M_{Be} = 0,02 \cdot M_T = 0,02 \text{ gr} \Rightarrow \bar{A}E(Be) = \frac{0,02 \text{ [gr]}}{9,01 \text{ [g]}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ [at]} =$$

$$\bar{A}E(Be) = 1,336 \cdot 10^{21} \text{ [at]}$$

$$\bar{A}E(\text{total}) = \bar{A}E(Cu) + \bar{A}E(Be) = 1,0621 \cdot 10^{22} \text{ [at]}$$

$$\Rightarrow \% \text{ at } (Cu) = \frac{\bar{A}E(Cu)}{\bar{A}E(\text{total})} = 9,874 = 87,4 \%$$

$$\Rightarrow \% \text{ at } (Be) = \frac{\bar{A}E(Be)}{\bar{A}E(\text{total})} = 12,6 \%$$

$$\therefore A = Cu - 12,6 \text{ Be}$$

* Haciendo lo mismo con las otras aleaciones:

$$B = Cu - 4,6 \% Be$$

$$C = Cu - 17 \% Be$$

* Como las proporciones se mantienen, se tiene:

$\rightarrow R_{Be} < R_{Cu}, R_{Al} \Rightarrow$ Soluto de menor radio que la matriz

$$\therefore \sigma_{(A)} > \text{Todos}$$

$$\rightarrow \% Al \text{ en } (B) < \% Al \text{ en } (C) \Rightarrow \sigma_{(B)} < \sigma_{(C)}$$

$$\therefore \sigma_{(A)} > \sigma_{(C)} > \sigma_{(B)}$$

(b) Ecuación de Hall-Petch

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k_y}{\sqrt{d}}$$

Constante del material (Aleación)

Límite de Fluencia

Tamaño promedio de grano

* Si $d \rightarrow \infty \Rightarrow \sigma_y = \sigma_0 \rightarrow d \rightarrow \infty$ representa un monocristal

$\therefore \sigma_0$: Límite de fluencia del monocristal
(Constante de la aleación)

$$\begin{aligned} \text{i) } 20 \mu\text{m} &\rightarrow 148 \text{ MPa} \\ 5 \mu\text{m} &\rightarrow 210 \text{ MPa} \end{aligned} \quad \left\{ \begin{aligned} \text{(I)} \quad 148 \text{ MPa} &= \sigma_0 + k_y \cdot \frac{1}{\sqrt{20 \mu\text{m}}} \\ \text{(II)} \quad 210 \text{ MPa} &= \sigma_0 + k_y \cdot \frac{1}{\sqrt{5 \mu\text{m}}} \end{aligned} \right.$$

$$\bullet \text{ (II) - (I)} \Rightarrow (210 - 148) = k_y \left(\frac{1}{\sqrt{5}} - \frac{1}{\sqrt{20}} \right) \Rightarrow k_y = 277,27 [\text{MPa} \cdot \mu\text{m}^{1/2}]$$

$$\bullet \text{ En (I)} \Rightarrow \sigma_0 = 148 - \frac{277,27}{\sqrt{20}} \Rightarrow \sigma_0 = 86 [\text{MPa}]$$

ii) Para 250 [MPa] y el mismo material, despejamos d desde la ec. de Hall-Petch

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k_y}{\sqrt{d}} \rightarrow \frac{\sigma_y - \sigma_0}{k_y} = \frac{1}{\sqrt{d}} \rightarrow d = \left(\frac{k_y}{\sigma_y - \sigma_0} \right)^2$$

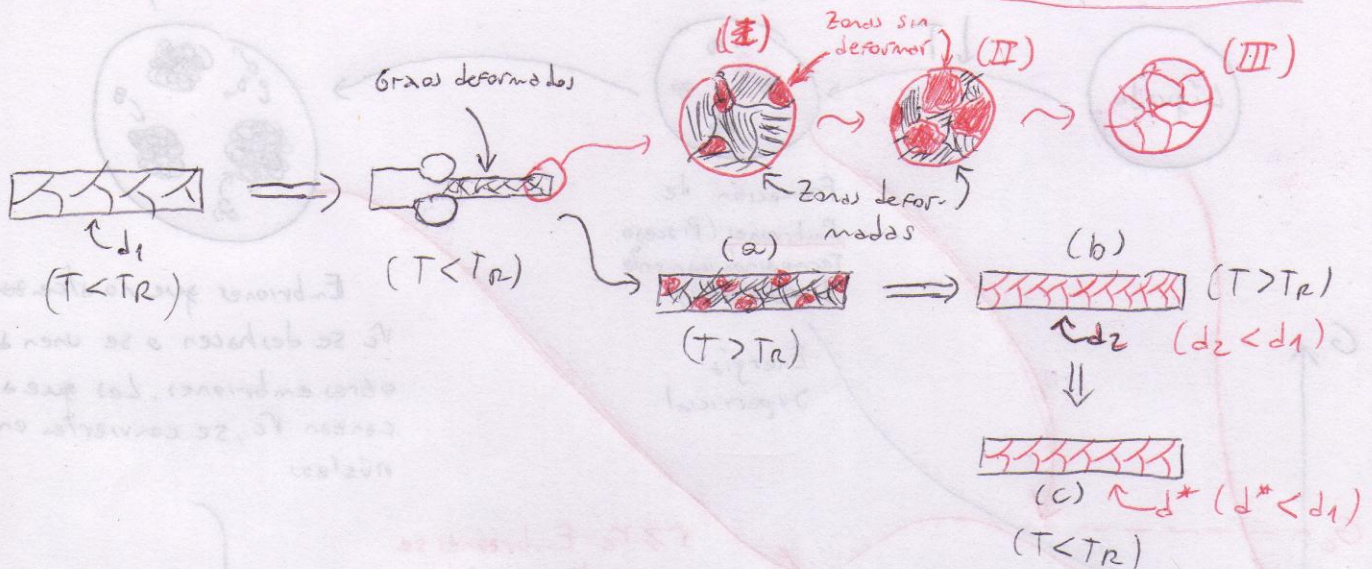
$$\therefore d = \left(\frac{277,27}{(250 - 86)} \right)^2 = 2,858 [\mu\text{m}]$$

iii) Proceso $\rightarrow$ Forma de hacerlo a nivel macro (o industrial)
Mecanismo $\rightarrow$ Lo que ocurre a nivel de granos cristalinos

* Proceso de reducción de tamaño de grano $\rightarrow$ Laminación en frío

(Def. plástica)

* Mecanismo de reducción de tamaño de grano $\rightarrow$ Recristalización



1-) Proceso $\rightarrow$ Se somete una lámina del material a laminación en frío ($T < T_R$). Luego se eleva la temperatura por sobre T_R (a) hasta que ocurra la recristalización por completo (b). Si el grano cristalino resultante es demasiado pequeño, se deja la temperatura alta hasta alcanzar el tamaño óptimo d^* (c).

2-) Mecanismo $\rightarrow$ Al someter la placa a laminación, se obtienen granos con alta def. plástica. Luego, se sube la temperatura por sobre T_R . Temperatura + Alta def. plástica inicia el proceso de recristalización.

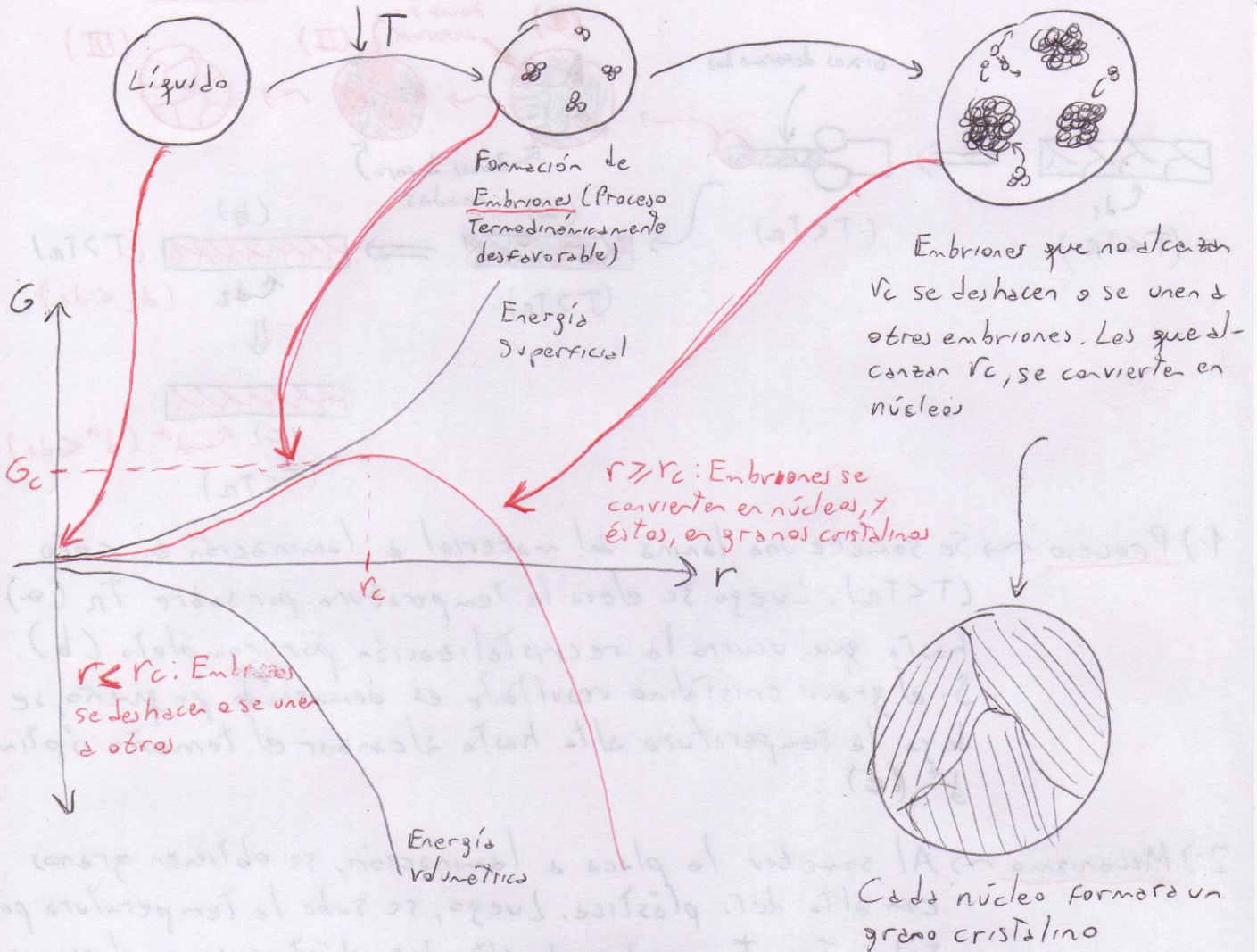
$\rightarrow$ (I): Las pocas zonas sin deformar actuarán como centros de nucleación de nuevos granos cristalinos, haciendo que los átomos cercanos tomen su orientación cristalográfica.

$\rightarrow$ (II): El proceso es activado por la temperatura, por lo que cada centro de nucleación crece.

$\rightarrow$ (III): La recristalización concluye cuando no quedan más zonas deformadas. Luego, continúa el proceso de crecimiento hasta que $T < T_R$.

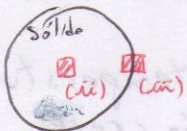
P2)

a) ANTES DE CONTESTAR LA PREGUNTA: Entendamos el mecanismo de nucleación y crecimiento de granos cristalinos desde la fase líquida



• ¿Y qué hay de la energía superficial/Volumétrica?

Líquido (i)



• Tanto en (i) como en (ii) las interacciones circundantes son homogéneas (Líquido con líquido y sólido con sólido respect)

• En (iii) (La interfase o superficie), las interacciones son heterogéneas

• Es energéticamente costoso crear superficie, por lo que se requiere otorgar energía. Sin embargo, al pasar a ser parte del bulk, se estabiliza, liberando energía

* Con eso en mente, contestemos la pregunta:

i) G_s : Energía superficial por unidad de área

G_v : Energía volumétrica por unidad de volumen

• Si la energía del grano puede dividirse en superficial y volumétrica, la variación de energía del grano se puede escribir como:

$$\Delta G_{gr} = -\frac{4}{3}\pi r^3 G_v + 4\pi r^2 G_s$$

Negativo, ya que crear volumen libera energía

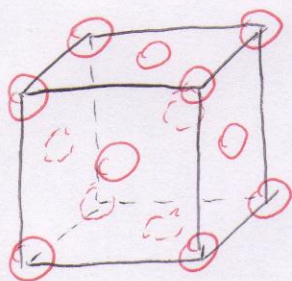
Positivo, ya que crear superficie absorbe energía

ii) Tomando la expresión anterior, derivándola respecto a r e igualando a 0 para encontrar el máximo:

$$\frac{\partial \Delta G_{gr}}{\partial r} = -4\pi r^2 G_v + 8\pi r G_s = 4\pi r (-r G_v + 2G_s) = 0$$

$$\therefore r_c = \frac{2G_s}{G_v}$$

b) Calculemos la densidad teórica (Donde se asume estructura perfecta)



FCC

En FCC $\rightarrow a = \frac{4}{\sqrt{2}} r_{Ni}$ (Radio Atómico)

$$a = 3,51 \cdot 10^{-10} \text{ [m]}$$

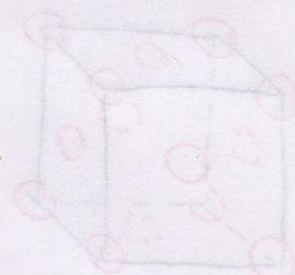
$$\therefore \rho_{Ni}^{Teo} = \frac{N_{at} \cdot P_{Ni}}{a^3} = \frac{4 [\text{át}] \cdot 58,69 \left[\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right] \cdot \frac{1}{6,02 \cdot 10^{23} \left[\frac{\text{át}}{\text{mol}} \right]}}{(3,51 \cdot 10^{-10})^3 \text{ [m}^3 \text{]}}$$

$$\rho_{Ni}^{Teo} = 9047,95 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

- La densidad teórica es mayor que la experimental debido a que en el cálculo NO se consideran impurezas o defectos de punto como vacancias, que reducen la densidad real.
- Calculando el porcentaje de vacancias (Asumiendo que es el único defecto en la red cristalina).

$$\% Vac = \frac{\rho_{Ni}^{Teo} - \rho_{Ni}^{exp}}{\rho_{Ni}^{Teo}} = \frac{9047,95 - 8887}{9047,95} \times 100$$

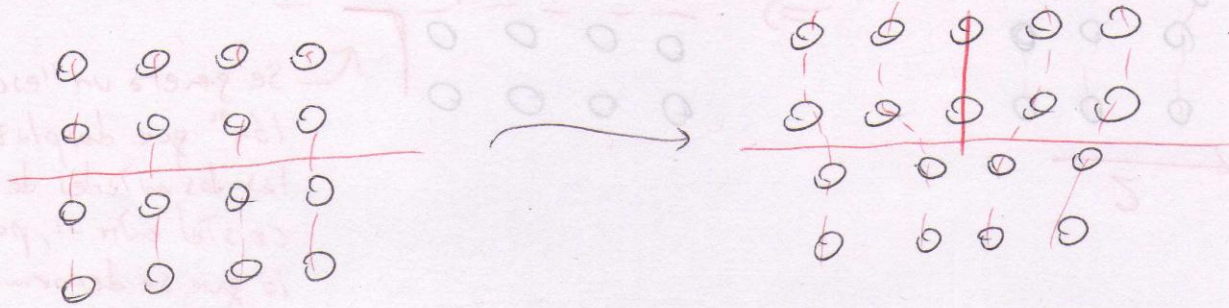
$$\therefore \% Vac = 1,78\%$$



$$\rho_{Ni}^{Teo} = \frac{Z \cdot M}{V_c \cdot N_A}$$

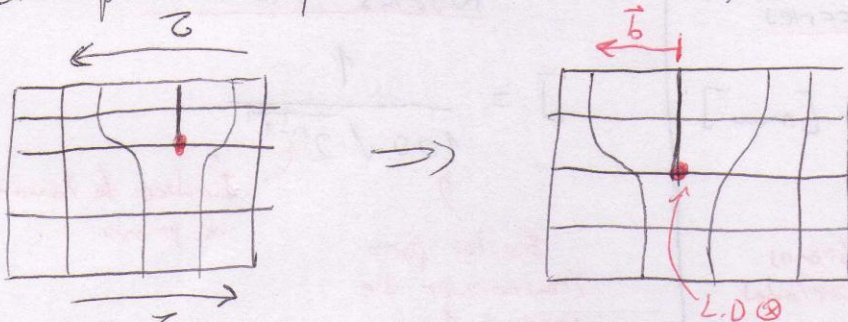
P3]

2) Dislocación: Presencia de un semi-plano de átomos extra en la red cristalina



• Línea de dislocación: Línea que se mueve a medida que la dislocación avanza (L.D.)

• Vector de Burgers: Indica la dirección hacia donde ocurre la distorsión provocada por la dislocación ($\vec{b}$)

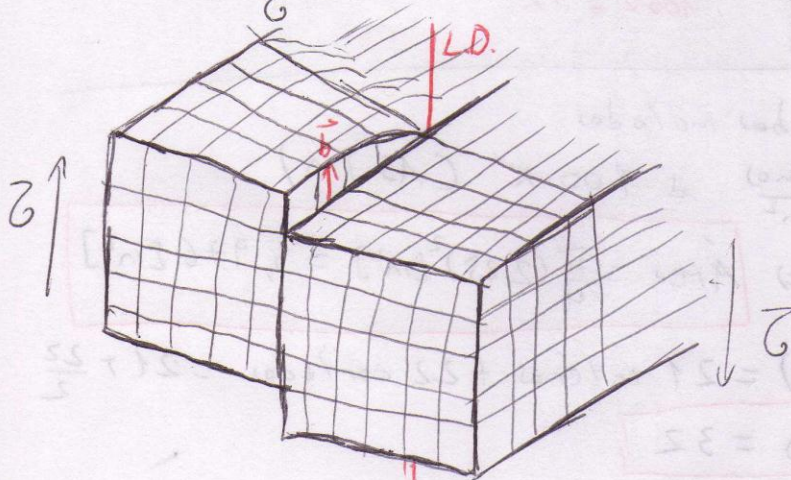


Para una dislocación de borde

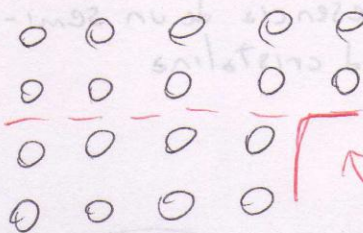
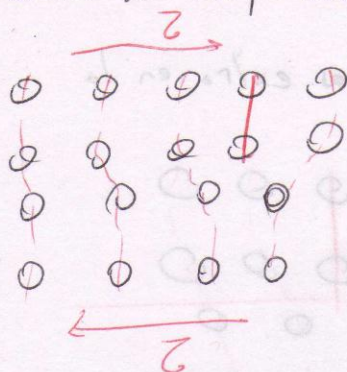
$$L.D. \perp \vec{b}$$

Para una dislocación de tornillo o helicoidal

$$L.D. \parallel \vec{b}$$



• ¿Cómo son responsables de la def. plástica?



Se genera un "esca-lón" que desplaza las dos mitades del cristal entre sí, por lo que se deforma el material

b) • Métodos de estimación de Tamaño de grano promedio utilizando micrografías

Método de Jeffries

$$\bar{d} = \frac{1}{\sqrt{F(N_c + \frac{N_a}{2})}} \text{ [mm]}$$

Factor de Jeffries
(100x → F=2)

(grano) entero

(grano) cortados

Norma ASTM

$$\bar{d} = \frac{1}{100 \sqrt{2^{n-1}}}$$

Factor para transformar de 100x a 1x

Índice de tamaño de grano

a) A veces se pueden mezclar ambos métodos

$$\Rightarrow N = 2^{n-1}, \text{ con } N = \frac{\text{granos}}{\text{in}^2} \text{ a } 100 \times \text{ (ASTM)}$$

• Diámetro = 2,25 in $\Rightarrow \text{Área} = \frac{\pi}{4} (2,25)^2 \text{ [in}^2] = 3,976 \text{ [in}^2]$

• N° de granos (según Jeffries) = 21 enteros + 22 cortados = $21 + \frac{22}{2}$

$N^\circ \text{ granos} = 32$

$$\Rightarrow N = \frac{\text{granos}}{\text{in}^2} = \frac{32 \text{ granos}}{3,976 \text{ in}^2} = 8,048 \frac{\text{granos}}{\text{in}^2}$$

$$\Rightarrow N = 2^{n-1} \leadsto \ln(N) = (n-1) \cdot \ln(2)$$

$$\therefore n = 1 + \frac{\ln(N)}{\ln(2)} = 1 + \frac{\ln(8,048)}{\ln(2)}$$

$$\boxed{\therefore n \approx 4}$$

$\Rightarrow$ Tamaño de grano:

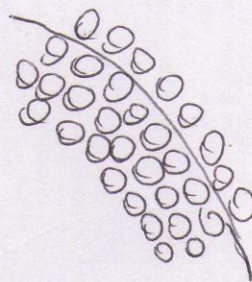
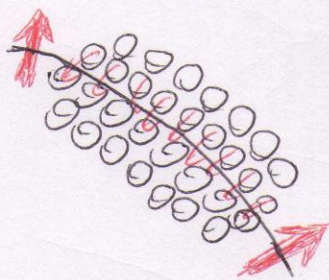
$$\text{ASTM} \Rightarrow \frac{1}{100\sqrt{2^3}} = 3,536 \cdot 10^{-3} [\text{in}] = \bar{d}_1 //$$

$$\text{Jeffries} \Rightarrow \bar{d}_1 = \frac{1}{\sqrt{100 \cdot 32}} = 0,0177 [\text{mm}] //$$

$$\text{ii) } n=2 \Rightarrow \bar{d}_2 = \frac{1}{100\sqrt{2}} = 7,07 \cdot 10^{-3} [\text{in}]$$

iii) $\bar{d}_2 > \bar{d}_1 \Rightarrow$ Crecimiento de tamaño de grano

- Proceso: Tratamiento térmico $\leadsto$ Elevar $T > T_R$ hasta alcanzar $\bar{d}_2$
- Mecanismo: Difusión rápida en borde de grano



Durante el crecimiento, átomos de un grano difunden hacia otro, tomando su orientación cristalográfica. Por lo tanto, un grano crece y el otro decrece

- El proceso ocurre hasta que uno de los granos desaparece
- En promedio, el tamaño de grano crece!