

Solidificazione dei Metalli

1 Introduzione

La solidificazione dei metalli è un processo fondamentale nella scienza e ingegneria dei materiali, utilizzato per la produzione di prodotti finiti e semilavorati. Questo processo avviene attraverso due stadi principali:

1. **Nucleazione:** formazione di nuclei stabili che daranno origine ai grani.
2. **Crescita dei grani:** sviluppo della struttura a grani, influenzata dai gradienti termici.

2 Nucleazione

La nucleazione è la fase iniziale della solidificazione ed è determinata dalla formazione di piccoli aggregati di atomi nel liquido. Esistono due meccanismi principali:

2.1 Nucleazione Omogenea

- Si verifica spontaneamente nel metallo stesso, senza l'ausilio di superfici estranee.
- Avviene solo se il metallo è sottoraffreddato in modo significativo.
- Gli atomi si muovono lentamente e tendono a legarsi formando **embrioni**.
- Se un gruppo di atomi supera una dimensione critica, esso diventa un **nucleo stabile** e cresce ulteriormente.
- Gli embrioni al di sotto della dimensione critica si dissolvono nuovamente nel liquido.

2.1.1 Energia Coinvolta nella Nucleazione Omogenea

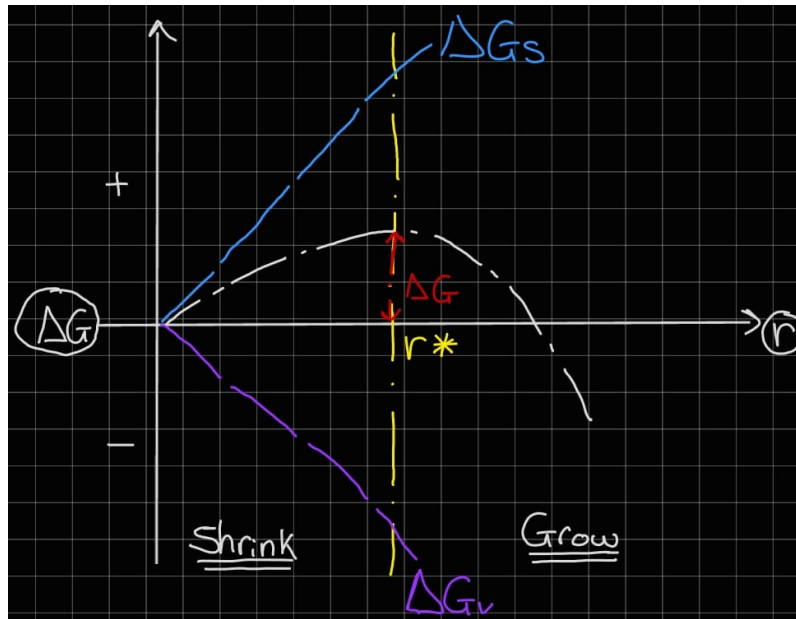
La nucleazione è influenzata da due contributi energetici opposti:

1. **Energia libera di volume (ΔG_v):**
 - Viene rilasciata nella transizione da liquido a solido.
 - Favorisce la crescita della fase solida.
2. **Energia di superficie (ΔG_s):**
 - Necessaria per la formazione di una nuova interfaccia solido-liquido.

- Ostacola la formazione dei nuclei.

L'energia libera totale del sistema è data dalla somma di questi due contributi e determina il **raggio critico** r^* , al di sopra del quale un nucleo cresce, mentre al di sotto di esso si dissolve.

2.1.2 Formule



- Energia libera di volume G_v

$$\Delta G_v = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_m \quad (1)$$

– ΔG_m = Energia libera di volume per unità di volume

$$\Delta G_m = \frac{\Delta H_f}{T_f}(T - T_f) = \frac{\Delta H_f}{T_f} \Delta T \quad (2)$$

- Energia di superficie G_s

$$\Delta G_s = 4\pi r^2 \gamma \quad (3)$$

– γ = Energia superficiale per unità di area

- Energia libera totale

$$\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_m + 4\pi r^2 \gamma \quad (4)$$

- Raggio critico

A r^* ($r_{critico}$)

$$\frac{d\Delta G}{dr} = 0 \quad (5)$$

$$r^* = -\frac{2\gamma}{\Delta G_v} \quad (6)$$

$$r^* = \frac{2\gamma T_m}{\Delta H_f \Delta T} \quad (7)$$

– Se $\Delta G \uparrow \iff r^* \downarrow$

– Se $\Delta G \downarrow \iff r^* \uparrow$

2.2 Nucleazione Eterogenea

- Avviene su superfici preesistenti come impurità o pareti dello stampo.
- Richiede una minore energia libera per la formazione dei nuclei.
- Riduce il sottoraffreddamento necessario per la solidificazione.
- Ampiamente utilizzata nelle industrie per controllare la microstruttura del materiale.

3 Crescita dei Cristalli e Struttura a Grani

Dopo la nucleazione, i cristalli crescono e si uniscono formando i **grani** del metallo solido. Le caratteristiche dei grani dipendono dalle condizioni di raffreddamento e dalla distribuzione dei siti di nucleazione.

3.1 Tipologie di Grani

- **Grani equiassici:**

- Cristalli di piccole dimensioni che crescono uniformemente in tutte le direzioni.
- Tipici di zone con elevata concentrazione di nuclei.
- Esempio: vicino alle pareti dello stampo freddo.

- **Grani colonnari:**

- Struttura allungata con crescita preferenziale lungo una direzione.
- Formati in aree con raffreddamento più lento e forte gradiente di temperatura.
- Tipici delle zone lontane dalle pareti dello stampo.

4 Solidificazione nelle Industrie

Nelle applicazioni industriali, il metallo fuso viene trasformato in prodotti mediante diverse tecniche di colata:

- **Colata semicontinua diretta:** utilizzata per produrre lingotti di alluminio.
- **Colata continua:** impiegata nella produzione di lingotti d'acciaio.

Per migliorare la struttura a grani, si utilizzano **raffinatori di grano**, come titanio, boro o zirconio nelle leghe di alluminio, che favoriscono una microstruttura pi' fine e uniforme.

5 Monocristalli e Applicazioni Avanzate

In alcune applicazioni ingegneristiche 'e richiesta la produzione di **monocristalli**, ovvero materiali privi di bordi di grano. Questo avviene tramite processi specifici:

- **Solidificazione di monocristalli:** impiegata per componenti soggetti ad alte temperature, come le palette di turbine.
- **Processo Czochralski:**
 - Utilizzato per la produzione di monocristalli di silicio per l'industria elettronica.
 - Un seme di cristallo viene immerso nel silicio fuso e poi lentamente estratto mentre ruota, consentendo la crescita del monocristallo.
 - Permette di ottenere lingotti di silicio monocristallino con diametri fino a circa 20 cm.

6 Conclusione

La solidificazione dei metalli 'e un processo complesso ma cruciale nella lavorazione industriale. La comprensione della nucleazione e della crescita dei grani consente di controllare le propriet'a meccaniche e strutturali dei materiali, migliorando la qualit'a dei prodotti finiti e ottimizzando le prestazioni nei settori tecnologici pi' avanzati.