

再結晶

金属材料などを塑性変形すると,結 晶内部に点欠陥,積層欠陥,転位な どの格子欠陥が多数導入され内部エ ネルギーが増加し硬化する.この結 晶を加熱すると格子欠陥密度が減少 し軟化する.このようなエネルギー 解放過程が回復・再結晶である.

4.1 加工組織 4.1.1 塑性変形の素過程



Fig. 4.1

塑性変形→結晶面のすべり →転位の移動

すべりは特定の結晶面上の特 定の方向に起こる。

すべり面:最密充填面 すべり方向:原子密度最大方向

4.1.2 塑性変形と蓄積エネルギー

「塑性変形を担った転位の -部は結晶内に残存する。」 →蓄積エネルギー

<u>単位長さ当たりの転位の弾性エネルギー</u>

$$E_o = \frac{\mu b^2}{4\pi K} \ln(\frac{R}{r_o})$$

<u>転位密度ρの材料における単位体積当たりの</u> <u>転位の弾性エネルギー</u>

$$E = \rho E_0 = \rho \frac{\mu b^2}{4\pi K} \ln(\frac{R}{r_o}) \cong \rho \mu b^2$$

転位密度は焼なまし状態で10¹⁰~ 10¹²/m²,変形後には10¹³~10¹⁵/m². 転位密度10¹⁴/m²の鉄の場合,

µ=80GPa, b=0.25nmとすると蓄積 エネルギーはE=5x10⁵J/m³.

材料が一定応力Sで均一に引張変 形されるとすると、伸びeを与えるた めの塑性変形に必要なエネルギーは 体積一定の条件からSlog(1+e).

応力400MPaで50%伸び(e=0.5)を 得るには7x10⁷J/m³程度のエネル ギーが必要であり、蓄積エネルギー はこれと比べて非常に小さい.

蓄積エネルギー<<仕事エネルギー<<

加工硬化: 「ひずみと共に転位密度が 増加することによって加工硬 化が起こる。」



	加工硬化	蓄積エネルギー
A	×	×
в	小	小
с	ゼロ	ゼロ

Fig. 4.2

「転位は、他の転位の運動の妨げ」

$$\tau = \tau_{o} + \alpha \mu b \sqrt{\rho}$$

4.1.3 不均一変形組織の形成 a. 肉眼で認められる変形組織

(1) リューダース帯または ストレッチャーストレイン :スプレー缶の底

(2) 肌荒れ(Orange peel)

(3) リジング : <mark>灰皿</mark> 4.1.3 不均一変形組織の形成 b. 顕微鏡レベルの微細変形組織



純金属型fcc金属およびbcc鉄の例

変形組織=F(積層欠陥エネルキー)

積層欠陥エネルギーが低い→転位が拡 張→交差すべりが起こりにくい→転位の 合体消滅が起こりにくい→回復が起こり にくい。

4.1.4 GN転位とSS転位

セルブロックが互いに異なる結晶 方位を持つ

→境界部に方位差を補償する
転位必要





4.2 回復 4.2.1 焼き鈍しによる諸性質の変化

回復段階: 点欠陥の消滅、転位の再配列



市販銅の場合

回復段階での硬さ変化は小さい

4.2 回復の機構 a.点欠陥の消滅 b.転位の消滅

合体消滅:らせん転位が先



Fig. 4.6

らせん転位の交差すべり合体消滅 は塑性変形中にも起こる。

4.2 回復の機構 c. 転位の再配列

ポリゴン化による転位の再配列 →小角粒界の形成



Fig. 4.7

$$\frac{b}{2d} = \sin\frac{\theta}{2}$$

$$\theta = b/d$$

「ポリゴン化」 セル組織:境界部に厚み → サブグレイン組織:境界部シャープ





4.3 再結晶

再結晶過程: (1) 蓄積エネルギーの減少 (2)結晶方位の変化



4.3 再結晶 4.3.1 1次再結晶の特徴

(1) 再結晶が起こるのに必要な最小変形 量がある.

(2) 変形量が小さいほど再結晶温度は 高い.

(3) 焼きなまし温度が低いほど再結晶に 長時間を要する.

(4) 再結晶粒径は主として変形量に依存 する.

(5) 同じ焼きなまし条件では, 変形前の 粒径が大きいほど再結晶に必要な臨界 変形量が大きい.

(6) 変形温度が高いほど臨界変形量が 大きい.

それぞれ「何故か?」を考えよう。₁₄ 鍵は核生成。

4.3 再結晶 4.3.2 再結晶粒の核生成



$$\Delta Ge = (\rho_m - \rho_r)\mu b^2$$

再結晶核の発生: 「均質な変形母相から転位密度 の低い領域が熱的揺らぎで生 成する」

 $\Delta g^* > 10^9 kT$

4.3.3 優先核生成場所

再結晶核の発生のための条件 (1)大角粒界の形成 (2) 蓄積エネルギーの差



(a) ABC粒間の方位差は 小さく、粒界は小角粒界



(b) 結晶粒AC=粒Bの合体



(c) 粒CC=の合体により大角 粒界で囲まれた核が形成

Fig. 4.9



サブグレインの合体機構







界面を押す力

$$P = \sigma(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}) = \frac{2\sigma}{R}$$

曲率半径R	圧力P
10µm	0.2MPa
1μm	2MPa

界面エネルギー: 1000mJ/m²

4.4 再結晶の速度論

再結晶のように新相の核生成と成長 を経て時間とともに進行する過程を定 量的に表すには、一般に相変態の速 度論が用いられる.

$Y = 1 - \exp(-Kt^n)$

変態速度式を導く場合の問題: (1)変態が起こった場所では新 相の核生成は起こらない。 (2)新相どうしの衝突により成長 は停止する。

4.4.1 拡張体積率

Fig. 4.14



点Pがn個の物体いずれにも含まれない 確率

$$U = \prod_{i=1}^{n} \left(1 - Y_i \right)$$

全ての小物体ViについてVi≪Voが満た されるときは, Yi≪1でln(1-Yi)=-Yiとお けるから

$$\ln U = \sum_{i=1}^{n} \ln(1 - Y_i) = -\sum_{i=1}^{n} Y_i$$

この式の右辺ΣYiは互いの重なりを無 視したn個の物体の体積率の総和であ る. これを拡張体積率Yeと呼ぶ.²⁰

$$\ln U = \sum_{i=1}^{n} \ln(1 - Y_i) = -\sum_{i=1}^{n} Y_i$$

この式の右辺ΣYiは互いの重なりを無 視したn個の物体の体積率の総和であ る. これを拡張体積率Yeと呼ぶ. 実際の体積率YはY=1-Uであるから,体 積率と拡張体積率の関係は、

$$Y = 1 - \exp(-Ye)$$

つまり変態速度式(4.13)を導くことは 拡張体積率を求めることに等しい.

導出過程からわかるように、この式は 新相の成長過程や形状、新相同士の 相互作用に無関係に成立する. 大切。 4.4.2 拡張体積率を用いた変態速 度式の導出

$$V(t,\tau) = \frac{4}{3}\pi G^3(t-\tau)^3$$

単位体積当たりの核生成速度をlvとすれば, 時刻 τ から τ +d τ の間に核生成した新相 粒子の数はIvd τ であるから,時刻 τ から τ+d τ の間に核生成した新相の拡張体積 率は

$$dYe = \frac{4}{3}\pi I_V G^3 (t-\tau)^3 d\tau$$

$$Ye = \frac{4}{3}\pi I_V G^3 \int_{\tau=0}^{\tau=t} (t-\tau)^3 d\tau = \frac{\pi}{3} I_V G^3 t^4$$

$$Y = 1 - \exp(-\frac{\pi}{3}I_{v}G^{3}t^{4})$$

$$Y = 1 - \exp(-\frac{\pi}{3}I_vG^3t^4)$$

Kolmogorov-Johnson-Mehl-Avramiの式



Avramiプロットで時間指数nがわかる

4.5 結晶粒成長





Fig. 4.20

正常粒成長と2次再結晶

4.5.1 1次再結晶後の内部エネルギー

$$\sigma_{\rm v} = \sigma S_{\rm v} = \frac{2\sigma}{L}$$

σ=1000mJ/m², L=20 μ mの時の粒界 エネルギーは10⁵J/m³であり, 4.1.2節 で求めた転位密度10¹⁴/m²での鉄の 蓄積エネルギーE=5x10⁵J/m³01/5で ある.

1次再結晶後も材料は比較的 大きな内部エネルギーを持っ ている.

4.5.1 正常粒成長



Fig. 4.20

正常粒成長と2次再結晶



Fig. 4.17

正常粒成長の2次元モデル

$$v = \frac{dR}{dt} = M \frac{2\sigma}{R}$$

 $D^2 - D_o^2 = Kt$, $K = 2M\sigma_{26}$

4.5.2 分散第2相粒子を含む結晶の 粒成長



Fig. 4.18

Fig. 4.19

$$R = \frac{4}{3} \frac{r}{f}$$

母相の結晶粒径を20µm(R=10µm)に 保持しようとすると、体積率f=0.01では r=75nmの微細粒子を分散させればよい ことがわかる. 27

4.6 動的回復と動的再結晶

加工温度をTm/2以上にすると、変形中に回復 や再結晶が起こる。これを動的回復(dynamic recovery: DR)、動的再結晶(dynamic recrystallization: DRX)と呼び、静的なものと区 別している。



ひずみ

ー定以上のひずみでは定常応力状態となっているが、この状態では材料中で塑性変形によるひずみの蓄積と再結晶によるひずみ解放が繰り返し起こっている.

定常応力状態では材料中の平均結晶粒径 は一定である。ひずみ速度が大きく変形温度 が低いほど、定常応力は高く平均結晶粒径は 小さい、また結晶粒は比較的等軸である。



N.D. Ryan & H.J. McQueen, Can.Metall.Quarterly, 29 (1990) 147



T. Sakai et al., Acta Metall., 31 (1983) 631

4.7 集合組織 4.7.1 結晶方位の表現



(110)[001]方位試料 (110)[001]方位試料 の{100}正極点図 の逆極点図

4.7 集合組織 4.7.2 変形集合組織



Fig. 4.25



Fig. 4.26



Fig. 4.27

(110)[001]方位は圧延に対して不 安定で、60%圧延後に(111)[-1-12] 方位へ変化する。 (001)[110]方位は圧延に対して安 定で方位回転を起こさない。

再結晶の挙動は?

4.7 集合組織 4.7.3 再結晶集合組織 4.7.4 再結晶集合組織の工業的 利用

> γファイバー:{111}<uvv> 薄板

Goss方位:{110}<001> 珪素鋼板

立方体方位:{100}<001> コンデンサー用アルミ箔

$$r = \frac{\ln(w / w_o)}{\ln(t / t_o)}$$