

CAPÍTULO IV

MECANISMOS DE ENDURECIMENTO

4.1

ENCRUAMENTO DOS METAIS

1 - DEFINIÇÃO E IMPORTÂNCIA

- O encruamento de um metal pode ser definido como sendo o seu endurecimento por deformação plástica.
- O encruamento ocorre basicamente porque os metais se deformam plasticamente por movimento de discordâncias e estas interagem diretamente entre si ou com outras imperfeições, ou indiretamente com o campo de tensões internas de várias imperfeições e obstáculos. Estas interações levam a uma redução na mobilidade das discordâncias, o que é acompanhada pela necessidade de uma tensão maior para provocar maior deformação plástica. Daí, o encruamento.
- Muitas teorias têm sido propostas para explicar o encruamento. A maior dificuldade reside no fato de determinar como a densidade e a distribuição das discordâncias varia com a deformação plástica.
- Segundo COTTRELL: “O encruamento foi o primeiro problema que a teoria de discordâncias tentou resolver e será provavelmente o último a ser resolucioado”.

2 - O FRACASSO DA EQUAÇÃO MECÂNICA DE ESTADO

- LUDWICK (1909) tentou modelar o comportamento mecânico dos metais pela seguinte matemática (equações):

$$\sigma = f(\epsilon, \epsilon^0, T)$$

Equação de Estado

- ♦ independente da história mecânica e/ou térmica.

- Porém estudos posteriores mostraram que a equação de estado é inconsistente com o comportamento normal do metal.
- Mais tarde, COTTRELL e STOKES determinaram que a diferença de valores das tensões observadas para introduzir uma certa deformação plástica num metal a duas temperaturas diferentes pode ser dividida em duas componentes:
 - a: Uma componente reversível com a temperatura
 - b: Uma componente que representa a diferença de encruamento produzida pela deformação em duas temperaturas.
- Verificou-se também que um processo de “recuperação”, dependente de T e ϵ , pode ocorrer simultaneamente com o processo primário de deformação.

3 - A CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO PARA MONOCRISTAIS

a: Estágio I:

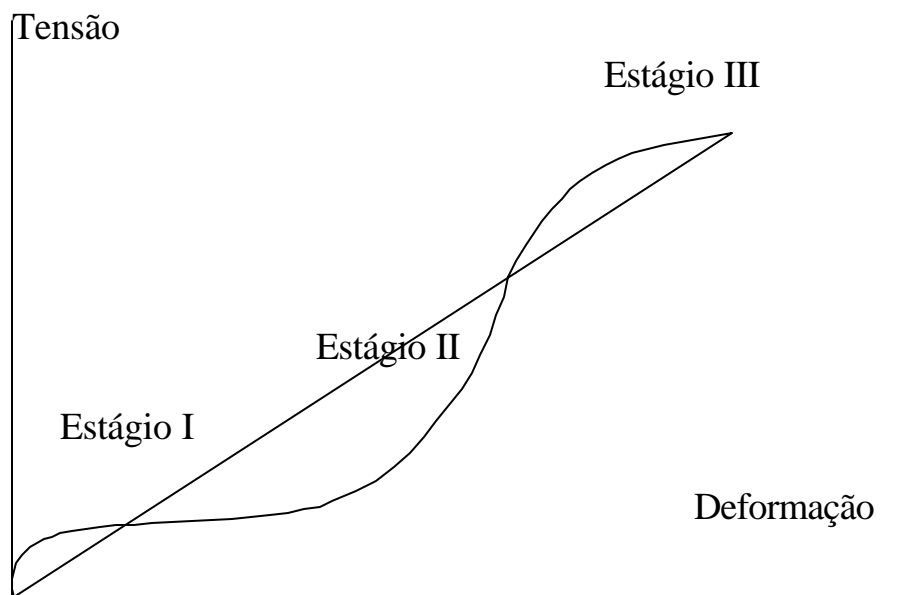
- Não ocorre deformação plástica significativa abaixo de uma certa tensão σ_0 (tensão crítica cisalhante resolvida).
- Assim que a tensão aplicada ultrapassa σ_0 , ocorre escoamento a uma baixa taxa de encruamento σ_1 .
- A taxa de encruamento σ_1 é governada por:
 - ⊕ resistência ao movimento de discordâncias (força de Peierls);
 - ⊕ interação discordâncias x defeitos de ponto;
 - ⊕ interação de discordâncias móveis com discordâncias que cortam os planos de deslizamento (floresta);
 - ⊕ arrastamento de degraus criados no ítem anterior;
 - ⊕ tensão necessária para curvar as discordâncias contra a tensão de linha das mesmas.
- Pode-se eliminar o estágio I, através de:
 - ⊕ Presença de pequenas quantidades de impureza
 - ⊕ Deformação de temperaturas elevadas
 - ⊕ Orientação do cristal numa posição relativa ao eixo de tração que favoreça deslizamento simultâneo em diversos sistemas de deslizamento.

b: Estágio II:

- A taxa de encruamento cresce rapidamente, até atingir um valor constante σ_{II} , de tal maneira que a tensão e a deformação se tornam linearmente relacionadas.
- Assim que o deslizamento começa em outros conjuntos de planos (sistema secundário), tem início uma forte interação entre as discordâncias do sistema primário com aquelas do secundário.
- Novas irregularidades são formadas no reticulado: degraus, anéis, emaranhados e empilhamentos.
- A temperaturas bem baixas, não ocorrem mudanças no desenvolvimento da estrutura de discordância, e conseqüentemente o estágio II estende-se até a fratura.

c: Estágio III:

- O coeficiente de encruamento diminui continuamente, e a curva σ vs. γ torna-se novamente parabólica.
- O comportamento do metal nesta região é extremamente dependente da temperatura e da velocidade de aplicação da carga.
- Admite-se que um processo de recuperação ocorre simultaneamente com a deformação.
- A recuperação altera a estrutura de discordâncias, diminui a taxa de encruamento e, conseqüentemente, as tensões instantâneas para escoamento plástico.
- Recentemente, MECKING e LUCKE (1969) contestaram a existência do estágio II, pois este seria apenas o começo do estágio III.



4 · ENCRUAMENTO EM POLICRISTAIS

- Devido à interferência mútua de grãos vizinhos e ao problema de compatibilidade de deformação em grãos adjacentes, o deslizamento múltiplo ocorre com facilidade e, conseqüentemente, há um encruamento apreciável durante a deformação de policristais.
- Os policristais não exibem o estágio I, enquanto que o estágio II tem sido observado. Em geral, a maior parte dos policristais se comporta conforme o estágio III.
- A relação entre tensão e densidade de discordâncias é similar à que foi observada para monocristais:

$$\tau \propto \rho^{1/2}$$

Uma relação similar é a equação de HALL-PEHM (1951/1953)

- Equação de LUDWIK (1909): $\sigma = \sigma_o + k_L \epsilon^{M_L}$
- Equação de HOLLOMON (1945): $\sigma = k_H \epsilon^{M_{HL}}$
- Equação de VOCE (1948): $\sigma = \sigma_o - k_v \exp(M_v \epsilon)$
- Equação de SWIFT (1952): $\sigma = h_s (\epsilon_o + \epsilon)^{M_s}$
- Equação de GUIMARÃES (1975): $\sigma - \sigma_o = \phi(\epsilon - \epsilon_o)$

5 · TRABALHO A QUENTE E A FRIO

- A deformação plástica que é realizada numa faixa de temperatura e sobre um intervalo de tempo tal que o encruamento não é aliviado é chamada de trabalho a frio (deformação a frio).
- Com o aumento de temperatura, a estrutura trabalhada a frio torna-se cada vez mais instável. Com isto, o encruamento dará lugar a uma restauração de ductilidade do metal.

6 · EFEITO BAUSCHINGER

- Definição: a tensão necessária para reverter a direção de deslizamento num certo plano é mais baixa do que a necessária para continuar o deslizamento na direção original.

- Mecanismo: decorrente da estrutura do estado trabalhado a frio.
- Importância: alteração de propriedades durante processos de conformação mecânica.

7 · AMOLECIMENTO POR DEFORMAÇÃO

- Descoberto por POLAKOWSKY (1952), tem sido observado em diversos metais. É uma manifestação da recuperação dinâmica.
- Exemplo do níquel (LONGO e REED-HILL - 1970):
 - ⌚ pré-deforma-se uma amostra do metal em uma temperatura bem baixa: a estrutura caracteriza-se por emaranhados e células de discordâncias.
 - ⌚ deforma-se o metal próximo da temperatura ambiente: as discordâncias movimentam-se para se atingir a configuração mais estável; não ocorre encruamento.