

# PMT3540 - Aula 8 - Endurecimento por irradiação

Cláudio Geraldo Schön

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

31 de outubro de 2018

# Mecanismos

- Clusters de defeitos
- Complexos defeitos-impurezas
- Aneis de discordância (com ou sem defeito de empilhamento)
- Discordâncias (aneis decompostos que se juntam à rede de discordâncias original)
- Cavidades e bolhas
- Precipitados

# Irradiação e resistência mecânica

Was distingue dois efeitos da irradiação:

- Efeito sobre a tensão de bloqueio – tensão necessária para que a discordância inicie o escorregamento
- Efeito sobre a tensão de fricção – tensão necessária para que a discordância mantenha o escorregamento

Was informa que em alguns casos a distinção pode não ser muito evidente.

## Efeitos sobre a tensão de bloqueio

Tensão de bloqueio é observado em metais CFC irradiados e em metais CCC irradiados e não irradiados → manifesta-se na curva  $\sigma \times \varepsilon$  como um limite de escoamento interior e um limite de escoamento superior.

- Tensão necessária para ativação das fontes de discordância que estão bloqueadas por defeitos puntiformes

(Was se limita a considerar fontes de Frank-Read, mas é importante lembrar que fontes em contorno de grão são tão ou mais importantes que fontes de Frank-Read)

## Desbloqueio de fontes de discordância

Em metais irradiados a presença de clusters de defeitos aumenta a tensão de desbloqueio da fonte, após a ativação da fonte a passagem da discordância dissolve os clusters e a deformação prossegue a tensão constante, em uma região limitada do material, conhecida como **Banda de Lüdders**.

## Operação de fontes de Frank-Read

A tensão de operação de uma fonte de Frank-Read ( $\sigma_{FR}$ ) é dada por:

$$\sigma_{FR} = \frac{Gb}{l}$$

onde  $l$  é a separação entre os pontos de travamento da fonte.

A transição suave entre o regime elástico e o regime plástico em materiais CFC (e CCC em algumas condições) é explicado por uma distribuição larga de distâncias entre pontos de travamento.

## Interação entre anel e trecho de discordância

Was propõe então um modelo, em que uma rede de anéis com defeito de empilhamento de discordância em cunha de vetor de Burgers  $b_\ell$ , raio  $r_\ell$  e separação  $l$  interage com um trecho heto de discordância, também em cunha com vetor de Burgers  $b$ , localizado a uma distância  $y$ . A discordância exerce uma força sobre os anéis tendendo a expandi-lo ou contraí-lo:

$$F = 2\pi r_\ell \sigma_{yy} b_\ell$$

O trabalho de expansão do anel é dado por:

$$\frac{dW}{dr} = 2\pi r \sigma_{yy} b_\ell \Rightarrow W = \pi r^2 \sigma_{yy} b_\ell$$

# Interação entre anel e trecho de discordância

Desenvolvendo para a força atuante na discordância ao longo de direção  $x$ :

$$F_x = - \frac{\partial W}{\partial x} = - \frac{Gb_\ell br^2}{1 - \nu} \frac{xy(3x - y)}{(x^2 + y^2)^3}$$

em que se usou a expressão para o campo elástico de uma discordância em cunha.

Segundo Was a força máxima é observada a um ângulo de aproximadamente  $40^\circ$  entre o vetor distância anel-discordância e que a expressão pode ser escrita em termos do raio do anel e da coordenada  $y$  (usando  $b_\ell = b$  e  $\nu = 0,3$ ):

$$F_x^{max} \approx 0,4Gb^2 \left(\frac{r}{y}\right)^2$$

usando  $F = \tau_e b l$  e assumindo  $y \approx 1,5r$  (baseado na microestrutura), temos:

$$\tau_e = 0,09 \frac{Gb}{l}$$

Que é muito menor que a tensão necessária para ativar a fonte de Frank-Read. Esse tensão adicional pode gerar um limite de escoamento nítido.



# Forças dissipativas

Was divide as contribuições dissipativas no movimento das discordâncias em duas categorias:

- Forças de long alcance,  $\sigma_L$  e
- Forças de curto alcance,  $\sigma_C$

As forças de long alcance surgem da interação da discordância com as demais discordâncias da microestrutura, as forças de curto alcance surgem da interação com defeitos mais localizados, como precipitados, cavidade e anéis.

# Forças de longo alcance

A força exercida por uma discordância sobre outra é máxima quando as duas se localizam no mesmo plano de escorregamento, e é dada por:

$$F^{max} = \frac{Gb^2}{2\pi(1-\nu)d}$$

onde  $d$  é a separação entre as discordâncias, que pode ser expressa em termos da densidade de discordâncias ( $\rho_d$ ) como:

$$d = \frac{1}{\sqrt{\pi\rho_d}}$$

Assim (assumindo  $\nu = 0,3$ )

$$F^{max} = \frac{3Gb^2\sqrt{\pi\rho_d}}{4\pi} \approx \frac{\sqrt{\pi}Gb^2\sqrt{\rho_d}}{4} = \alpha Gb^2\sqrt{\rho_d}$$

com  $\alpha \approx 0,44$ .

A tensão necessária para superar essa força é  $\sigma_L = \frac{F^{max}}{b}$  (seja  $L$  o comprimento da linha de discordância,  $bL = A$ )

$$\sigma_L \approx \alpha Gb\sqrt{\rho_d}$$

# Forças de curto alcance

Precipitados incoerentes (mecanismo de Orowan)

A tensão de linha de uma discordância em cunha é dada por:

$$\Gamma \approx \frac{Gb^2}{4\pi} \ln \left( \frac{R}{r_c} \right)$$

lembrando,  $r_c$  é o raio do núcleo e  $R$  é uma distância característica da microestrutura (em casos anteriores, o tamanho de grão, mas aqui será proporcional á distância entre partículas ( $l_p$ ):

$$R = \frac{l_p}{2}$$

# Forças de curto alcance

Precipitados incoerentes (mecanismo de Orowan)

A tensão de escoamento está associada à tensão de linha por:

$$\tau_{CRSS} = \frac{\Gamma}{bR}$$

resultando em

$$\tau_{CRSS} \approx \frac{Gb}{2\pi l_p} \ln \left( \frac{l_p}{2r_c} \right)$$

# Forças de curto alcance

Precipitados incoerentes (mecanismo de Orowan)

Considerando o número de partículas por unidade de volume ( $N_p$ ):

$$l_p = (N_p)^{-\frac{1}{2}}$$

temos

$$\tau_{CRSS} = \alpha_p G b \sqrt{N_p}$$

com

$$\alpha_p = \frac{1}{2\pi} \ln \left( \frac{l_p}{2r_c} \right)$$

# Forças de curto alcance

## Precipitados coerentes

Certos precipitados podem ser cortados por discordâncias, o endurecimento pode vir por vários fatores:

- 1** O aumento da área de interface precipitado - matriz (interfaces tem tensão superficial, aumentar a área implica dissipar energia)
- 2** Criação de contornos de anti-fase (normalmente esses [precipitados coerentes são ordenados, a passagem da discordância perturba a orde, com o defeito tem energia maior que o do cristal perfeito, dissipando energia)
- 3** Diferença de módulo e de tensão de Peierls (podem afetar a tensão de linha da discordância)

# Forças de curto alcance

## Precipitados coerentes (modelo de Russel e Brown)

Sejam  $E_1$  e  $E_2$  as energias dos trechos de discordância no interior da partícula e na matriz. O modelo estabelece que:

$$\phi_{min} = 2 \sin^{-1} \left( \frac{E_1}{E_2} \right)$$

Para a resistência:

$$\sigma_e = \begin{cases} 0,8 \frac{Gb}{l_p} \left( 1 - \frac{E_1^2}{E_2^2} \right)^{\frac{1}{2}} & \Leftarrow \phi_{min} \leq 50^\circ \\ 0,8 \frac{Gb}{l_p} \left( 1 - \frac{E_1^2}{E_2^2} \right)^{\frac{3}{4}} & \Leftarrow \phi_{min} > 50^\circ \end{cases}$$

onde

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{E_1^\infty \ln \left( \frac{r_p}{r_c} \right)}{E_2^\infty \ln \left( \frac{R}{r_c} \right)} + \frac{\ln \left( \frac{R}{r_p} \right)}{\ln \left( \frac{R}{r_c} \right)}$$

onde  $E_{1,2}^\infty$  são as densidades de energia das discordâncias nas fases isoladas.

# Forças de curto alcance

## Cavidades (e bolhas)

Cavidades atuam como precipitados coerentes, para fins de endurecimento. A força necessária para cortar uma cavidade,  $F_V$ :

$$F_V = \frac{U_V}{r_V} = \tau_{CRSS} b l_V$$

onde  $U_V$  é a energia elástica do sólido com volume equivalente ao da cavidade,  $r_V$  é o raio da cavidade e  $l_V$  é a distância entre cavidades no plano de escorregamento.

A energia elástica de discordância é dada por:

$$U_d = \frac{Gb^2}{8\pi^2 r_V^2}$$

A energia elástica pode ser aproximada por:

$$U_V = \int_{r_c}^R 4\pi r^2 U_d dr = \frac{Gb^2}{2\pi} (R - r_c) \approx \frac{Gb^2 R}{2\pi}$$



# Forças de curto alcance

## Cavidades (e bolhas)

Cavidades atuam como precipitados coerentes, para fins de endurecimento. A força necessária para cortar uma cavidade,  $F_V$ :

$$F_V = \frac{U_V}{r_V} = \tau_{CRSS} b l_V$$

onde  $U_V$  é a energia elástica do sólido com volume equivalente ao da cavidade,  $r_V$  é o raio da cavidade e  $l_V$  é a distância entre cavidades no plano de escorregamento.

A energia elástica pode ser aproximada por:

$$U_V = \int_{r_c}^R 4\pi r^2 U_d dr = \frac{Gb^2}{2\pi} (R - r_c) \approx \frac{Gb^2 R}{2\pi}$$

Resolvendo para a tensão:

$$\tau_{CRSS} = \frac{1}{2\pi} \frac{Gb}{l_V} \Rightarrow \tau_{CRSS} = \alpha_V Gb \sqrt{N_V}$$

que é inferior ao derivado para o modelo de Orowan, indicando que cavidades são menos eficientes para produzir endurecimento.

# Superposição dos mecanismos de endurecimento

Os diversos mecanismos podem ser expressos por relação do tipo:

$$\tau_{CRSS} = \alpha' Gb\sqrt{\rho'}$$

As diferentes contribuições são consideradas aditivas e ao final a tensão crítica projetada pode ser convertida em limite de escoamento do policristal, usando-se o fator de Taylor:

$$\sigma_e = M\tau_{CRSS}$$

## Velocidade média da discordância

A velocidade média é dada por:

$$\bar{v} = \beta b \nu_d \exp \left[ -\frac{\Delta G(\tau)}{k_B T} \right]$$

onde

$$\Delta G(\tau) = \Delta F \left[ 1 - \left( \frac{\tau}{\tau_0} \right)^p \right]^q$$

em que  $\Delta F$  é uma energia de ativação,  $\tau_0$  é a tensão de superação de obstáculo a 0 K, e  $0 \leq p \leq 1$  e  $1 \leq q \leq 2$  são coeficientes fenomenológicos, com valores razoáveis em torno de  $p = \frac{2}{3}$  e  $q = \frac{3}{2}$ .

## Dependência da taxa de deformação

Como a taxa de deformação depende da velocidade média de discordâncias:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \exp \left[ -\frac{\Delta F}{k_B T} \left( 1 - \frac{\tau}{\tau_0} \right)^p \right]^q$$

## Justificativa e resultados empíricos

De acordo com o que foi discutido, o endurecimento por irradiação deveria ser contínuo e proporcional à raiz quadrada do dano:

$$\Delta\sigma_e \propto N^{\frac{1}{2}} \Rightarrow \Delta\sigma_e \propto (\phi t)^{\frac{1}{2}}$$

Entretanto essa conclusão conflita com a observação de que a microestrutura de deformação satura acima de uma certa dose.

## Modelo de Makin e Minter

Quando uma cascata é produzida em uma região, produz o dano, mas cascatas posteriores na mesma região não irão produzir dano adicional → zona de exclusão.

$$\frac{dN}{dt} = \zeta \Sigma_s \phi (1 - VN) \Rightarrow N = \frac{1}{V} [1 - \exp(-\zeta \Sigma_s V \phi t)]$$

onde  $\zeta$  é o número de zonas produzidas por colisão (para nêutrons,  $\zeta = 1$ ),  $\Sigma_s$  é a seção de choque e  $V$  é o volume irradiado.

## Modelo de Makin e Minter

Portanto:

$$\Delta\sigma_e = A[1 - \exp(-B\phi t)]^{\frac{1}{2}}$$

com

$$A = \alpha M G b \sqrt{\frac{d}{V}}$$

e

$$B = \zeta V \Sigma_s$$

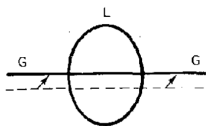
# Instabilidade plástica

- O efeito da irradiação sobre o limite de escoamento é muito maior que o efeito sobre o limite de resistência (redução da razão elástica) → localização da deformação (formação de bandas de deformação) → queda do alongamento uniforme.
- Destruição dos anéis sésseis pela passagem de discordâncias glisseis

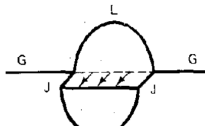


# Modelos de destruição de anéis

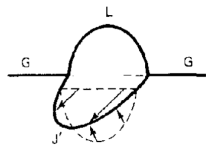
Foremen - Sharp (1969)



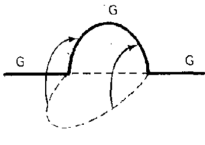
(a)



(b)



(c)



(d)

# Modelos de destruição de anéis

Gelles (1981)

