

PMT3306 - Mecânica dos Materiais - Atividade 3 - 01/10/2019 - Gabarito

Nome da atividade – Exercícios sobre escorregamento de discordâncias (*dislocation glide*).

Descrição – A classe será dividida em 6 grupos, cada grupo receberá uma pergunta como tarefa e trabalhará por um período de 50 minutos nessa resposta, ao final um dos membros do grupo irá apresentar o resultado das questões à classe e o instrutor comenta.

Questões

1. Deduza a expressão para a tensão de cisalhamento projetada usada na lei de Schmidt, supondo que o corpo de prova monocristalino agora tem uma seção transversal inicialmente quadrada. Existe alguma dependência com relação à orientação dos lados do quadrado em relação ao vetor de Burgers?

OBS.: Desenhe a ação do sistema de escorregamento sobre o corpo de prova e estime a área do plano que escorrega.

R.: A Figura 1 mostra um plano de escorregamento arbitrário em um corpo de prova com seção transversal quadrada, qualquer que seja a configuração particular (os ângulos dos traços dos planos na superfície do corpo de prova) o plano pode ser transformado em um que tem um formato retangular, com um dos lados dado por $a \cos(\phi)$. Assim concluímos que a expressão do fator de Schmidt permanece inalterada.

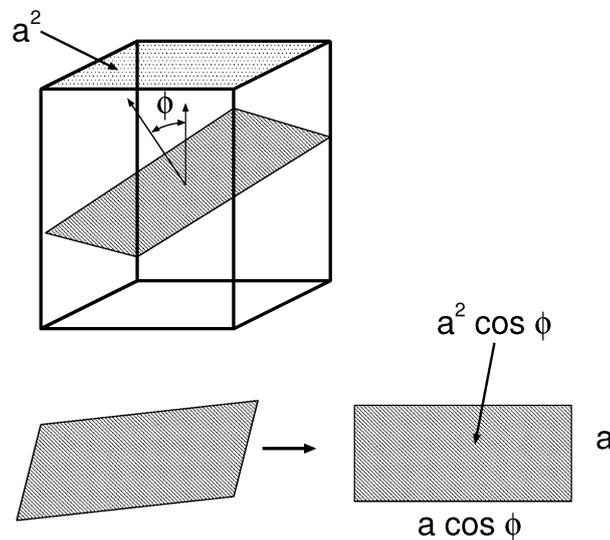


Figura 1: Representação de um plano de escorregamento arbitrário em um corpo de prova com seção transversal quadrada.

2. O cobre com 99,999% de pureza tem uma tensão crítica projetada para o escorregamento no sistema $\frac{a_0}{2} \langle 1\bar{1}0 \rangle \{111\}$ de 0,65 MPa. Calcule qual será o vetor de Burgers e o plano de escorregamento que será inicialmente ativado para um monocristal cilíndrico com seção transversal inicialmente circular e estime o valor da tensão normal de escoamento, supondo que o eixo do corpo de prova corresponde à direção $[1\bar{3}5]$.

Obs.: Liste os índices dos 12 sistemas de escorregamento da estrutura CFC e calcule os fatores de Schmidt para todos, deduzindo qual será ativado.

R.: A Tabela 1 apresenta o cálculo do fator de Schmidt para os doze sistemas de escorregamento de uma estrutura CFC, para o caso de um corpo de prova orientado com eixo ao longo de $[1\bar{3}5]$.

Tabela 1: Cálculo do fator de Schmidt para um corpo de prova CFC orientado ao longo de $[1\bar{3}5]$.

h	k	l	u	v	w	u1	v1	w1	$\cos \phi$	$\cos \lambda$	S
1	1	1	1	-1	0	1	-3	5	0.2928	0.4781	0.1400
1	1	1	1	0	-1	1	-3	5	0.2928	-0.4781	-0.1400
1	1	1	0	1	-1	1	-3	5	0.2928	-0.9562	-0.2799
1	1	-1	1	-1	0	1	-3	5	-0.6831	0.4781	-0.3266
1	1	-1	1	0	1	1	-3	5	-0.6831	0.7171	-0.4899
1	1	-1	0	1	1	1	-3	5	-0.6831	0.2390	-0.1633
1	-1	1	1	1	0	1	-3	5	0.8783	-0.2390	-0.2100
1	-1	1	1	0	-1	1	-3	5	0.8783	-0.4781	-0.4199
1	-1	1	0	1	1	1	-3	5	0.8783	0.2390	0.2100
-1	1	1	1	1	0	1	-3	5	0.0976	-0.2390	-0.0233
-1	1	1	1	0	1	1	-3	5	0.0976	0.7171	0.0700
-1	1	1	0	1	-1	1	-3	5	0.0976	-0.9562	-0.0933

Vemos que o sistema de escorregamento com maior fator de Schmidt é $\frac{a_0}{2}[101](11\bar{1})$. O limite de escoamento esperado será:

$$\sigma_e = \frac{\tau_{CRSS}}{0.4899} = 1.327 \text{MPa} \quad (1)$$

3. A Tabela 3 apresenta valores de tensões críticas projetadas (τ_{CRSS}) para a prata com três níveis de pureza diferentes, calcule uma estimativa para o limite de escoamento de um corpo de prova monocristalino com seção transversal inicialmente cilíndrica com eixo orientado na direção $[1\bar{2}1]$ para cada um dos níveis de pureza e discuta o que se espera para a estrutura de discordâncias desses materiais em tensões levemente superiores ao limite de escoamento (há estágio de *easy glide*?). O que faz o limite de escoamento aumentar com a diminuição

da pureza? Note que a prata é CFC e as discordâncias escorregam no sistema $\frac{a_0}{2} < \bar{1}\bar{1}0 > \{111\}$.

Obs.: Calcule os limites de escoamento para os três casos e verifique se apenas um sistema de escorregamento é ativado no início do escorregamento, lembre-se o que significa para a composição da liga a prata ter impurezas.

Tabela 2: Tensões críticas projetadas para a prata com três níveis de pureza

Pureza (%)	τ_{CRSS} [MPa]
99,99	0,48
99,97	0,73
99,93	1,3

R.: A Tabela 3 apresenta o cálculo dos fatores de Schmidt para os 12 sistemas de escorregamento da Prata, para um corpo de prova orientado ao longo de $[1\bar{2}1]$. Vemos que essa

Tabela 3: Cálculo do fator de Schmidt para um corpo de prova CFC orientado ao longo de $[1\bar{3}5]$.

h	k	l	u	v	w	u1	v1	w1	$\cos \phi$	$\cos \lambda$	S
1	1	1	1	-1	0	1	-2	1	0.0000	0.3586	0.0000
1	1	1	1	0	-1	1	-2	1	0.0000	0.0000	0.0000
1	1	1	0	1	-1	1	-2	1	0.0000	-0.3586	0.0000
1	1	-1	1	-1	0	1	-2	1	-0.1952	0.3586	-0.0700
1	1	-1	1	0	1	1	-2	1	-0.1952	0.2390	-0.0467
1	1	-1	0	1	1	1	-2	1	-0.1952	-0.1195	0.0233
1	-1	1	1	1	0	1	-2	1	0.3904	-0.1195	-0.0467
1	-1	1	1	0	-1	1	-2	1	0.3904	0.0000	0.0000
1	-1	1	0	1	1	1	-2	1	0.3904	-0.1195	-0.0467
-1	1	1	1	1	0	1	-2	1	-0.1952	-0.1195	0.0233
-1	1	1	1	0	1	1	-2	1	-0.1952	0.2390	-0.0467
-1	1	1	0	1	-1	1	-2	1	-0.1952	-0.3586	0.0700

é uma direção "dura", o máximo fator de Schmidt é 0,07, o que significa que os limites de escoamento serão altos ($\frac{1}{0.07} \approx 14.3$, vide Tabela 4). Mais importante que isso, dois sistemas de escorregamento estão bem orientados para iniciar atividade já no escoamento, então se conclui que nesse experimento os corpos de prova **não** apresentarão estágio de "easy glide" e entrarão diretamente no estágio de escorregamento parabólico, gerando rapidamente uma estrutura de discordâncias composta por células de discordância. Quanto ao fator que leva ao aumento de τ_{CRSS} com a diminuição da pureza, trata-se de endurecimento

por solução sólida. Impurezas da prata são basicamente Au e Cu, que entram em solução sólida substitucional, levando ao aumento da resistência à movimentação das discordâncias.

Tabela 4: Limites de escoamento para a prata com três níveis de purezas nos sistemas de escorregamento ativados.

Pureza (%)	σ_e [MPa]
99,99	6,86
99,97	10,44
99,93	18,6

4. A tensão crítica de clivagem tem uma dependência com a orientação de monocristais semelhante àquela que derivamos para escorregamento de discordâncias, a diferença é que a tensão crítica de clivagem é uma tensão normal (a força deve ser projetada na direção da normal do plano de clivagem), deduza a expressão para a tensão crítica de clivagem em função dos ângulos definidos para a tensão de cisalhamento projetada crítica.

Obs.: Lembre-se da dedução da expressão para a tensão de cisalhamento crítica projetada, que está no livro, e deduza a expressão pedida.

R.: Como explicado no enunciado, a força deve ser projetada na direção da normal do plano de clivagem, assim a componente da força nessa direção, F_ϕ , será:

$$F_\phi = F \cos(\phi) \quad (2)$$

e a tensão crítica de clivagem, σ_c será:

$$\sigma_c = F \cos(\phi) \times \frac{\cos(\phi)}{A} = \sigma \cos^2(\phi) \quad (3)$$

5. Bhattacharya e Niewczas¹ fazem a seguinte afirmação (adaptada para a tradução): “Monocristais (de Mg) orientados para escorregamento no plano basal apresentam um encruamento em duplo estágio, um estágio de baixa taxa de encruamento seguido de um estágio de alta taxa de encruamento. A mínima taxa de encruamento, da ordem de $10^{-4}G$, é observada quando o plano basal se encontra a 45° da direção de tração, isto é, quando o fator de Schmidt do sistema melhor orientado para escorregamento é $\approx 0,5$.” Interprete o que o autor quis dizer com essa afirmação.

Obs.: Interprete as informações dadas.

R.: Os autores afirmam que a deformação de monocristais de Mg se procede de forma semelhante ao que vimos para metais CFC, com um estágio de “easy glide” seguido de

¹B. Bhattacharya, M. Niewczas “Work-hardening behavior of Mg single crystals oriented for basal slip” *Phil. Mag.* **91**, 2011, 2227 – 2247.

outro, que pode ser linear ou parabólico. Ainda, os autores afirmam que para monocristais que apresentam um plano basal localizado próximo a 45° da tensão normal aplicada. Para esses casos, como a direção de escorregamento é livre, sempre haverá um vetor de Burgers bem orientado. Nesse caso a taxa de encruamento será da ordem de $10^{-4}G$, o que é muito baixo.

6. Ferro, com a estrutura Cúbica de Corpo Centrado, possui discordâncias com vetor de Burgers $\frac{a_0}{2} < 111 >$ orientadas em hélice, que podem escorregar em planos das famílias $\{1\bar{1}0\}$, $\{1\bar{2}1\}$, $\{12\bar{3}\}$, no que é conhecido como “pencil glide”. Aparentemente a tensão crítica projetada para qualquer um desses planos é a mesma e vale 27 MPa. Suponha que um monocristal está orientado favoravelmente para que o sistema $\frac{a_0}{2}[111](0\bar{1}1)$ seja ativado no limite de escoamento, mas que, pela ação de algum bloqueio, esse sistema não possa ser ativado. Calcule o incremento de tensão que deve ser dado ao sistema, de acordo com a lei de Schmidt, para ativar o próximo sistema de escoamento que essa discordância pode atingir por deslizamento cruzado (*cross slip*).

Obs.: Liste todos os sistemas de escorregamento possíveis, assuma que o fator de Schmidt para os sistema $\frac{a_0}{2}[111](0\bar{1}1)$ é 0,5 (máximo) e o fator de Schmidt do próximo plano e recalcule a tensão.

R.: Para resolver esse exercício basta listar quais são os outros planos de escoamento compatíveis com o vetor de Burgers $\frac{a_0}{2}[111]$ e calcular o cosseno do ângulo entre esses planos e o plano $(01\bar{1})$, aquele que tiver o valor mais próximo da unidade será também o mais próximo na orientação. Os planos da família $\{1\bar{2}1\}$ são: $(1\bar{2}1)$, $(\bar{2}11)$ e $(11\bar{2})$. Já para a família $\{12\bar{3}\}$ temos: $(12\bar{3})$, $(21\bar{3})$, $(1\bar{3}2)$, $(2\bar{3}1)$, $(\bar{3}12)$ e $(\bar{3}21)$. Calculando o cosseno do ângulo desses planos em relação ao plano $(01\bar{1})$ vemos que os planos $(12\bar{3})$ e $(1\bar{3}2)$ apresentam um cosseno valendo $\pm 0,9449$, o que corresponde a $\pm 19^\circ$ de inclinação em relação ao plano original. O valor do limite de escoamento será aumentado por um fator $0,9449^{-1} = 1,058$.