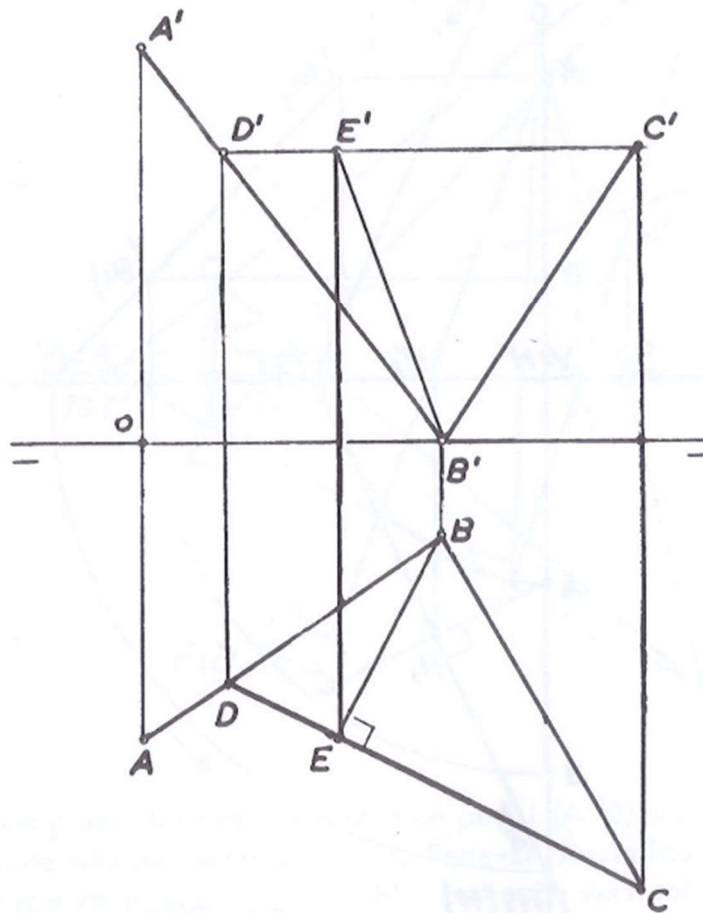


Questão 1:

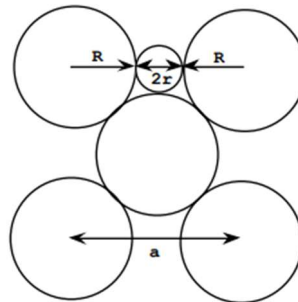
Locados os pontos dados, têm-se as retas auxiliares $(A)(B)$ e $(B)(C)$ concorrentes em (B) , e que definem o plano cujos traços não podem ser determinados por exigência do problema. Traça-se então uma horizontal auxiliar $(C)(D)$ do plano dado e como a reta de máximo declive tem sua projeção horizontal perpendicular à projeção horizontal de qualquer horizontal do plano, traça-se BE perpendicular a CD e tem-se E' sobre $C'D'$. A reta $(B)(E)$ é de máximo declive do plano dado.



Ref.: PRÍNCIPE JÚNIOR, A. R.; *Noções de Geometria Descritiva*. São Paulo. Ed. Nobel S.A, 33 Ed. Volume 1, 1989, Capítulo III.

Questão 2:

- a) No desenho abaixo são mostrados os átomos na face (100) de uma célula unitária CFC; o sítio interstício octaédrico está no centro da borda.



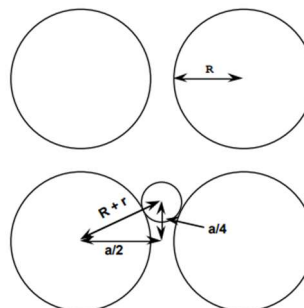
O diâmetro de um átomo que caberá neste local ($2r$) é apenas a diferença entre o comprimento da borda da célula unitária (a) e os raios dos dois átomos hospedeiros (R) que estão localizados em cada lado da posição intersticial; ou seja:

$$2r = a - 2R$$

Entretanto, para CFC parâmetro de rede (a) está relacionado a R de acordo com a Equação $a = 2R\sqrt{2}$; assim:

$$r = \frac{a - 2R}{2} = \frac{2R\sqrt{2} - 2R}{2} = 0.41R$$

- b) Uma face (100) de uma célula unitária CCC é mostrada abaixo.



O átomo intersticial que cabe neste sítio intersticial é mostrado pelo pequeno círculo. Ele está situado no plano desta face (100), a meio caminho entre as duas bordas verticais da célula unitária e a um quarto da distância entre as bordas inferior e superior da célula. Do triângulo retângulo definido pelas três setas podemos escrever:

$$\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{a}{4}\right)^2 = (R + r)^2$$

Entretanto, para CCC o parâmetro de rede (a) está relacionado a R de acordo com a Equação $a = 4R/\sqrt{3}$; assim:

$$\left(\frac{4R}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{4R}{4\sqrt{3}}\right)^2 = R^2 + 2Rr + r^2$$

Após o rearranjo, resulta na seguinte equação quadrática:

$$r^2 + 2Rr - 0.667R^2 = 0$$

E ao resolver para r, $r = 0.29R$.

- c) Baseado nos valores obtidos, observa-se que o sítio intersticial no ferro CCC é menor que o sítio intersticial no ferro CFC. Embora ambos sejam menores que o átomo de carbono, o carbono distorce mais a estrutura cristalina CCC do que a CFC. Como resultado, espera-se que menos átomos de carbono entrem em posições intersticiais no ferro CCC do que no ferro CFC.

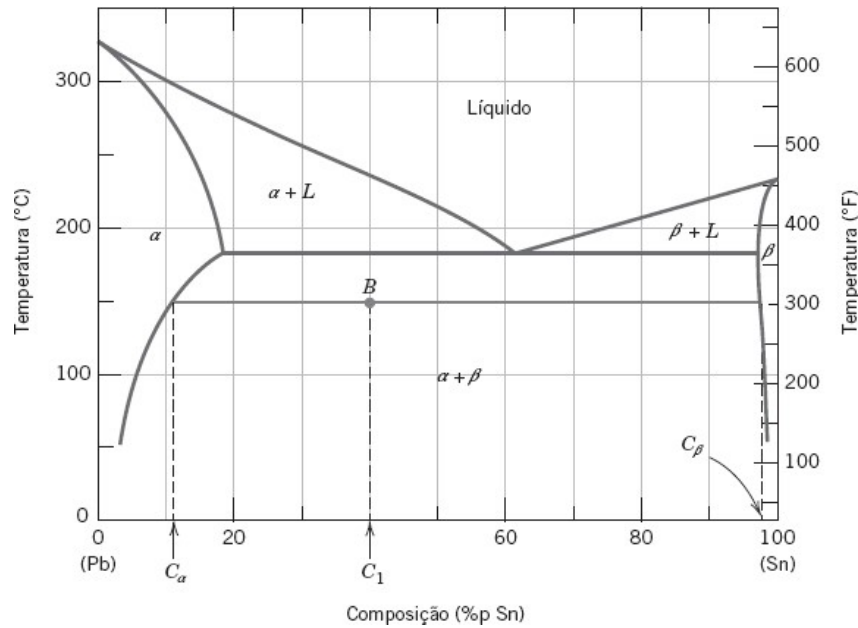
Ref.: WILLIAN D. Callister Jr. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais, Uma Abordagem Integrada**. Ed. LTC. 2 Ed., 2006. Capítulo 5.

Questão 3:

- a) Primeiro, esse ponto temperatura-composição é localizado no diagrama de fases (ponto B na Figura). Uma vez que ele está na região $\alpha + \beta$, as fases α e β coexistirão.
- b) Uma vez que duas fases estão presentes, é necessário construir uma linha de amarração através do campo das fases $\alpha + \beta$ a 150 °C, como indicado na Figura. A composição da fase α corresponde à interseção da linha de amarração com a linha solvus, $\alpha/(\alpha + \beta)$ – em aproximadamente 11 %p Sn–89 %p Pb, representada como C_α . De maneira semelhante, a fase β tem uma composição de aproximadamente 98 %p Sn–2 %p Pb (C_β).
- c) Uma vez que a liga consiste em duas fases, é necessário empregar a regra da alavanca. Se C_1 representa a composição global da liga, as frações mássicas podem ser calculadas pela subtração das composições, em termos da porcentagem em peso de estanho, da seguinte maneira:

$$W_\alpha = \frac{C_\beta - C_1}{C_\beta - C_\alpha} = \frac{98 - 40}{98 - 11} = 0,67$$

$$W_\beta = \frac{C_1 - C_\alpha}{C_\beta - C_\alpha} = \frac{40 - 11}{98 - 11} = 0,33$$



Ref.: WILLIAN D. Callister Jr. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais, Uma Abordagem Integrada**. Ed. LTC. 2 Ed., 2006. Capítulo 10.

Questão 4:

4 - FATORES METALÚRGICOS NA CONFORMAÇÃO MECÂNICA DOS METAIS

4.1 - Introdução

O presente capítulo trata de alguns problemas metalúrgicos comuns a vários processos de conformação mecânica, tais como:

- Temperatura de trabalho (seção 4.2)
- Velocidade de deformação (seção 4.3)
- Estrutura metalúrgica (seção 4.4)
- Formabilidade (seção 4.5)

Os problemas acima mencionados constituem cada um, por si só, grandes campos de estudo e como tais fogem ao objetivo do presente texto. Assim é que se apresentam aqui somente alguns aspectos mais importantes das áreas em pauta.

4.2 - Influência da temperatura em processos de conformação mecânica de metais

Metais e suas ligas são comumente conformados em temperaturas que variam desde a ambiente até próximas ao início de sua fusão. Como elas variam muito para diferentes materiais, é comum, em conformação mecânica, tomar a temperatura de processamento de um dado metal em relação à sua temperatura de início de fusão, ambas em grau Kelvin

(K). Ao quociente destas temperaturas denomina-se temperatura homóloga, que é adimensional.

$$T_h = \frac{T}{T_F} \quad (4.1)$$

T - temperatura da peça (K)

T_F - temperatura de início de fusão do metal (K)

T_h - temperatura homóloga

A resistência mecânica dos metais normalmente cai quando T_h aumenta, como ilustrado na Figura 4.1. Do ponto de vista da conformação mecânica, isso significa que menor potência será necessária para executar a operação à medida que T_h aumenta. No entanto, à medida que isso ocorre, usualmente as taxas de oxidação do metal ao ar crescem, devendo-se eventualmente limitar o valor de T_h . Alguns metais, tais como o zircônio e o titânio, oxidam-se violentamente a altas temperaturas, e o oxigênio absorvido torna-os completamente frágeis.

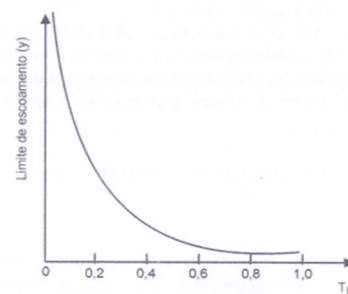


Figura 4.1 - Variação típica do limite de escoamento de um metal com aumento em T_h .

Considerando o metal sendo deformado, classifica-se comumente a operação em deformação a quente e a frio. Na deformação a frio, o material endurece por encruamento durante a deformação. Na deformação a quente, que ocorre normalmente para T_h acima de cerca de 0,6, ocorre um amaciamento simultaneamente com o encruamento, e a tensão de escoamento do metal cai com a temperatura. Para o caso de metais de baixo ponto de fusão, a temperatura ambiente pode ser suficiente para o processamento a quente. Um exemplo deste caso seria o chumbo ($T_p \approx 327^\circ\text{C}$). O nióbio ($T_p \approx 2\,415^\circ\text{C}$) deveria ser aquecido a cerca de $1\,000^\circ\text{C}$ para ser deformado a quente. O exercício 4.1 ilustra um caso interessante.

A capacidade de um metal de sofrer deformação a frio é limitada pela ocorrência de fratura. Assim, frequentemente utilizam-se ciclos de “deformação/recristalização estática” quando se deseja conferir aos metais grande deformação a frio. Nestes ciclos, o material endurecido pela deformação é aquecido, após o processamento, a temperaturas homólogas acima de 0,5, ocorrendo nele um amaciamento. Este processo denomina-se recristalização estática (ou simplesmente recristalização), e pode ser empregado novamente após outra deformação a frio do material amaciado. A observação da microestrutura metalográfica de um material deformado a frio revela normalmente grãos alongados na direção em que o material sofreu maior deformação. Após a recristalização estática, estes grãos mostram-se equiaxiais, demonstrando a ocorrência de um rearranjo da microestrutura. O tamanho destes grãos dependerá da temperatura de recristalização e da deformação sofrida pelo metal.

Pode-se deformar extensamente um metal por deformação a quente, devido ao amaciamento que ocorre logo após a deformação. Frequentemente, considera-se a recristalização dinâmica (isto é, concomitante com a deformação) como responsável pelo amaciamento em pauta. Isso não ocorre sempre,

4.3 - A influência da velocidade de deformação em processos de conformação mecânica de metais

Quando se deforma um metal, a maior parte da energia cedida a este metal é transformada em calor. Quanto maior for a velocidade de deformação, menor será a dissipação desse calor, e, conseqüentemente, maior será a temperatura do produto fabricado. Este problema é de particular importância na deformação a quente, onde o aumento de temperatura considerado pode causar a fusão do metal, caso sua temperatura inicial for alta demais.

A velocidade de deformação influi sobre a tensão necessária para deformar um metal, particularmente para altos valores de T_h . Frequentemente, expressa-se esta dependência através de uma lei do tipo mostrado abaixo:

$$Y = Y_0 \dot{\epsilon}^m \quad (4.2)$$

onde Y é a tensão de escoamento do material, Y_0 e a são constantes, e $\dot{\epsilon}$ é a velocidade de deformação, definida como a seguir:

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} \text{ (s}^{-1}\text{)} \quad (4.3)$$

Na equação acima, ϵ e t são, respectivamente, a deformação e o tempo. O coeficiente m (equação 4.2) mostra quão sensível é a tensão de escoamento a variações em $\dot{\epsilon}$, e é chamado “coeficiente de sensibilidade da tensão de escoamento à velocidade de deformação”. As Tabelas 4.1 e 4.2 mostram valores de m e Y_0 para o cobre, alumínio e aço, testados à compressão para $\dot{\epsilon}$ variando entre aproximadamente 1 e 40 s^{-1} . Esse tipo de ensaio é frequentemente utilizado, pois o ensaio a tração não permite obter valores da tensão de escoamento para grandes deformações devido à ocorrência de estricções. Para se obter alta velocidade de deformação, constante durante toda a compressão, frequentemente se utiliza uma máquina especial

e, para alguns metais, observam-se grãos alongados na sua microestrutura imediatamente após a deformação, como é o caso do alumínio. Para outros metais, pode ocorrer a recristalização dinâmica; para averiguar a ocorrência ou não deste fenômeno, deve-se examinar a microestrutura dos metais imediatamente após a conformação. Curtos períodos de tempo decorridos após a deformação podem ser suficientes para promover a recristalização estática do produto, fenômeno este diverso daquele que pode estar ocorrendo durante a deformação. Para metais que não sofrem recristalização dinâmica, é possível evitar a ocorrência da recristalização estática pelo rápido resfriamento do metal após a conformação. Esta técnica é comumente empregada no caso de ligas Al-Mg.

As taxas de difusão atômica são muito aceleradas durante a conformação a quente. Isto é particularmente importante na eliminação de heterogeneidades químicas (tais como segregação) e quando se deseja acelerar um processo que dependa da difusão atômica, como a esferoidização(*) de um aço, por exemplo.

Do ponto de vista do produto a ser obtido, é de grande importância a consideração da história termomecânica a que ele foi submetido durante seu processamento. Sua microestrutura metalográfica (tamanho de grão, distribuição e tamanho de microconstituintes) pode ser frequentemente controlada através de modificações desta história. Um exemplo deste tipo de processamento industrial é a “Stelmorização” de fios-máquina, onde aços de alto carbono (em torno de 0,8% C) são resfriados rapidamente até cerca de 750°C após a deformação a quente. O resfriamento ulterior também é forçado, mas mais lento e sob jatos de ar, obtendo-se uma estrutura perlítica bastante fina.

* Esferoidização: termo usualmente empregado pelos profissionais da área para designar a estrutura de aços onde a cementita (nome metalúrgico para o carboneto de ferro: Fe_3C) encontra-se com uma forma aproximadamente esférica.

denominada plastômetro de camo. Os valores das tabelas já consideram o aquecimento provocado pela deformação e exposto no primeiro parágrafo desta seção.

Tabela 4.1 - Valores do coeficiente m da equação $Y = Y_0 \dot{\epsilon}^m$

Metal	Temperatura °C	Valores de m para compressão de				
		10%	20%	30%	40%	50%
Al	18	0,013	0,018	0,018	0,018	0,02
	150	0,022	0,022	0,021	0,021	0,026
	250	0,026	0,031	0,035	0,041	0,041
	350	0,055	0,061	0,073	0,084	0,088
	450	0,1	0,098	0,1	0,116	0,13
	550	0,13	0,13	0,141	0,156	0,155
Cu	18	0,01	0,001	0,002	0,006	0,01
	150	0,014	0,016	0,02	0,023	0,026
	300	0,016	0,018	0,017	0,025	0,024
	450	0,01	0,004	0,008	0,014	0,031
	600	0,05	0,043	0,041	0,056	0,078
	750	0,096	0,097	0,128	0,186	0,182
	900	0,134	0,11	0,154	0,195	0,19
Fe	930	0,088	0,084	0,094	0,099	0,105
	1 000	0,108	0,1	0,09	0,093	0,122
	1 060	0,112	0,107	0,117	0,127	0,15
	1 135	0,123	0,129	0,138	0,159	0,198
	1 200	0,116	0,122	0,141	0,173	0,196

A Figura 4.2 mostra a variação de m com a variação em T_h ; os dados foram retirados da Tabela 4.1. Observa-se que m cresce com a temperatura; assim, a tensão de escoamento dos metais analisados é mais sensível à velocidade de deformação à medida que a temperatura cresce. Esta conclusão é válida para os metais em geral, e a avaliação da resistência à deformação de um metal a altas temperaturas a partir de ensaios lentos (típicos de máquinas universais de ensaio) pode, então, levar a erros grosseiros se os resultados forem utilizados para situações onde o metal será deformado rapidamente. Os resultados numéricos obtidos no exercício 4.2 são significativos.

Tabela 4.2 - Valores do coeficiente Y_0 na equação $Y = Y_0 \dot{\epsilon}^m$

Metal	Temperatura °C	Valores de Y_0 para compressão de				
		10%	20%	30%	40%	50%
Al	18	14,6	17,1	18,9	20,6	22,0
	150	11,4	13,5	15	16,1	17,0
	250	9,1	10,5	11,4	11,9	12,3
	350	6,3	6,9	7,2	7,3	7,4
	450	3,9	4,3	4,5	4,4	4,3
	550	2,2	2,4	2,5	2,4	2,4
Cu	18	26,3	40,3	49	54,1	55,7
	150	23,1	32,4	37,8	41,5	43,5
	300	20,2	26,5	30,2	32,2	34,4
	450	17,0	22,5	25,1	26,6	26,8
	600	12,7	16,8	18,9	19,4	19,0
	750	7,6	9,7	10,0	8,5	8,2
900	4,7	6,3	6,1	5,5	5,2	
Fe	930	16,3	19,4	20,4	20,9	20,9
	1 000	13,0	15,6	17,3	18,0	16,9
	1 060	10,9	12,9	14,0	14,4	13,6
	1 135	9,1	10,5	11,2	11,0	9,9
	1 200	7,6	8,6	8,8	8,3	7,6

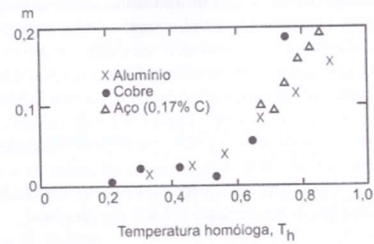


Figura 4.2 - Variação do parâmetro m com a temperatura homóloga T_h

Finalmente, deve-se observar que, à medida que a velocidade de deformação cresce, também aumenta a temperatura T_h que deve ser alcançada para se trabalhar no regime de deformação a quente. Os processos de amaciamento do metal durante sua conformação são basicamente termicamente ativados. A maior velocidade de deformação exige que eles se passem em menor tempo, o que somente se dará se a temperatura de processamento T_h for aumentada.

4.4 - Influência das variáveis metalúrgicas em processos de conformação mecânica de metais

As propriedades dos metais estão estreitamente ligadas à sua composição e microestrutura. Para metais puros, seu ponto de fusão dá uma indicação da intensidade da ligação entre os átomos; assim, quanto mais alta a temperatura de fusão de um metal puro, maior resistência terá o metal a uma determinada temperatura.

A adição de elementos de liga a um metal altera a situação acima, já que o início de fusão de uma liga se dá nor-

Ref.: HELMAN, Horacio; CETLIN, Paulo Roberto. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2 Ed., Artliber, 1993. Capítulo 4.

Membros da Banca:

Avaliador 1: Prof. André Hideto Futami

Avaliador 2: Prof. Athos Henrique Plaine

Presidente da Banca: Prof. Adolfo René Santa Cruz Rodriguez



Assinaturas do documento



Código para verificação: **6EF230QH**

Este documento foi assinado digitalmente pelos seguintes signatários nas datas indicadas:

✓ **ADOLFO RENE SANTA CRUZ RODRIGUEZ** (CPF: 003.XXX.779-XX) em 20/11/2023 às 12:18:25
Emitido por: "SGP-e", emitido em 13/07/2018 - 13:11:44 e válido até 13/07/2118 - 13:11:44.
(Assinatura do sistema)

✓ **ANDRÉ HIDETO FUTAMI** (CPF: 106.XXX.268-XX) em 20/11/2023 às 12:22:02
Emitido por: "SGP-e", emitido em 10/02/2020 - 15:14:30 e válido até 10/02/2120 - 15:14:30.
(Assinatura do sistema)

✓ **ATHOS HENRIQUE PLAINE** (CPF: 363.XXX.808-XX) em 20/11/2023 às 12:34:59
Emitido por: "SGP-e", emitido em 16/04/2019 - 16:13:58 e válido até 16/04/2119 - 16:13:58.
(Assinatura do sistema)

Para verificar a autenticidade desta cópia, acesse o link <https://portal.sgpe.sea.sc.gov.br/portal-externo/conferencia-documento/VURFU0NfMTlwMjJfMDAwNTE3NjVfNTE4MTVfMjAyM182RUYYMzBRSA==> ou o site <https://portal.sgpe.sea.sc.gov.br/portal-externo> e informe o processo **UDESC 00051765/2023** e o código **6EF230QH** ou aponte a câmera para o QR Code presente nesta página para realizar a conferência.