



FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - FEM/UNICAMP

Rua Mendeleev, 200 - CEP 13083-860

Cidade Universitária "Zeferino Vaz" Barão Geraldo

Campinas - SP www.fem.unicamp.br

EXPERIMENTO 2: ENCRUAMENTO E RECOZIMENTO

Objetivo:

Observar e avaliar o efeito da deformação plástica, da temperatura e do tempo de recozimento (pós-deformação) nas etapas de recuperação, recristalização e crescimento de grão e nas propriedades mecânicas.

Teoria:

Processos envolvendo deformação plástica de materiais metálicos como aqueles observados na laminação ou no forjamento, provocam a modificação da microestrutura do material processado, introduzindo diversos tipos de defeitos, tais como vacâncias, discordâncias, falhas de empilhamento e também, a transformação morfológica dos grãos cristalinos. Parte da energia empregada nessa deformação plástica permanece armazenada no material associada aos defeitos citados. Dessa maneira, o estado de trabalhado a frio ou encruado é uma condição de maior energia interna do que o material não-deformado. Embora a estrutura de discordâncias do material trabalhado a frio seja mecanicamente estável, ela não é termodinamicamente estável. Com o aumento da temperatura, o estado trabalhado a frio torna-se cada vez mais instável, resultando nos fenômenos de recuperação, recristalização e crescimento de grãos.

O tratamento térmico envolvido na recuperação, na recristalização e no crescimento de grãos é conhecido como recozimento. O recozimento é comercialmente muito importante, porque restaura a ductilidade de um metal que tenha sido severamente encruado. Assim, pela interposição de operações de recozimento após grandes deformações, é possível conseguir elevadas percentagens de deformação para a maioria dos metais.

O processo de recozimento pode ser dividido em três processos distintos: recuperação, recristalização e crescimento de grão, mostrados na Figura 1. A recuperação é normalmente definida como a restauração das propriedades físicas do metal trabalhado a frio sem que ocorra alguma mudança visível na microestrutura. A resistividade elétrica da amostra durante a recuperação diminui rapidamente para o valor do material recozido e a deformação da rede cristalina, quando avaliada por difração de raios-X, é apreciavelmente reduzida. As propriedades que são mais afetadas pela recuperação são aquelas que são sensíveis aos defeitos pontuais. A resistência mecânica, que é controlada pelo movimento de discordâncias não é afetada de forma significativa pelo processo de recuperação.

A recuperação envolve mudanças no número e distribuição de defeitos de ponto e discordâncias. Em baixas temperaturas, a recuperação ocorre pela aglomeração de defeitos de ponto, como vazios e átomos intersticiais, e também, pela migração dos defeitos de ponto para discordâncias, contornos de grão e superfícies externas. Em temperaturas suficientemente altas, as discordâncias podem eventualmente ganhar mobilidade apreciável e se mover tanto por escorregamento de planos como escalagem para aliviar as deformações internas. As discordâncias agrupadas nas paredes das células que se formaram durante a deformação se recompõem. Algumas discordâncias de sinais opostos se aniquilam. As paredes dessas células se tornam mais claramente definidas e são chamadas de subgrãos. Por meio deste processo decresce a densidade de discordâncias no interior das células.

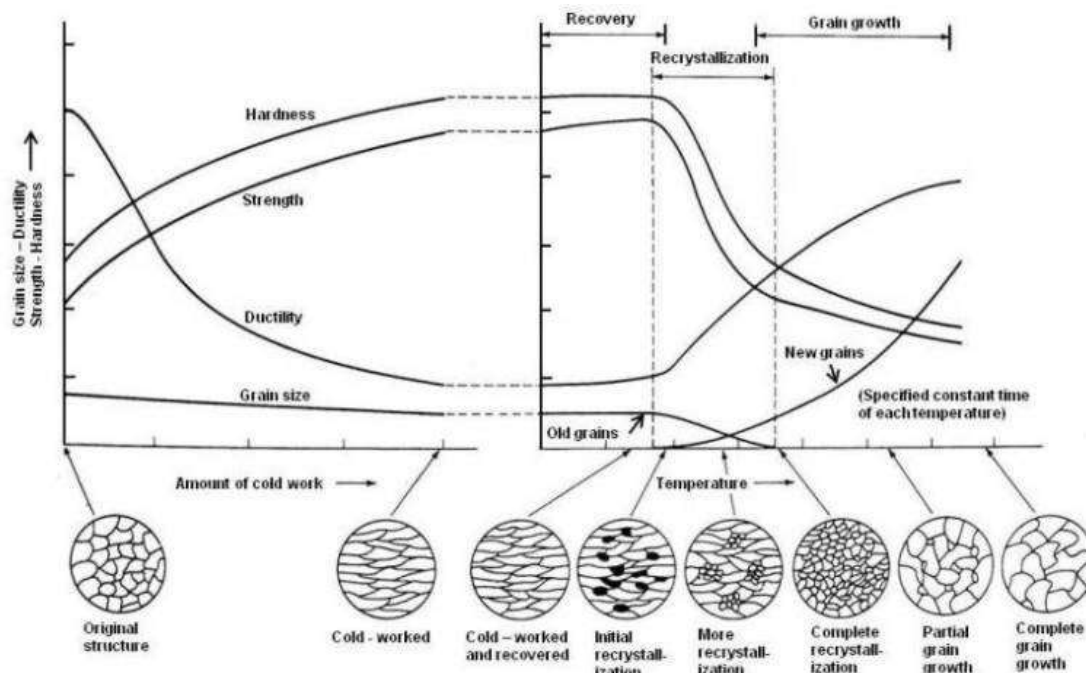


Figura 1: Representação esquemática do encruamento e recozimento, mostrando seus efeitos nas propriedades e microestrutura.

A recrystalização é a substituição da estrutura trabalhada a frio por um novo grupo de grãos livres de deformação. A recrystalização é facilmente detectada por métodos metalográficos e é evidenciada pela diminuição da dureza ou da resistência mecânica e pelo aumento da ductilidade. A densidade de discordâncias diminui consideravelmente na recrystalização e todos os efeitos do encruamento são eliminados. A energia armazenada no trabalho a frio é a força motriz tanto para a recuperação quanto para a recrystalização.

Se os novos grãos livres de deformação são aquecidos a temperaturas maiores que a requerida para causar a recrystalização, ocorrerá o crescimento gradativo do tamanho de grão. A força motriz para o crescimento de grão é a diminuição da energia livre da área de contornos de grão devido ao crescimento de grão.

A Figura 2 mostra a progressão de uma microestrutura deformada a frio para uma estrutura com grãos finos recrystalizados e, finalmente, para uma com tamanho de grão maior, devido ao crescimento dos mesmos.

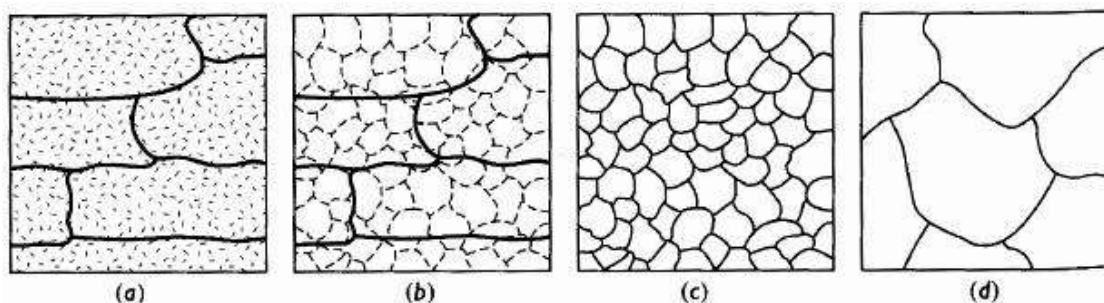


Figura 2: Representação esquemática da microestrutura de um material após (a) trabalho a frio; (b) recuperação; (c) recrystalização e (d) crescimento de grão.



FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - FEM/UNICAMP

Rua Mendeleev, 200 - CEP 13083-860

Cidade Universitária "Zeferino Vaz" Barão Geraldo

Campinas - SP www.fem.unicamp.br

O processo de recristalização consiste na nucleação de uma região livre de deformação, cujo contorno pode transformar a matriz deformada em um material livre de deformação à medida que o mesmo se move. No crescimento do contorno a partir do núcleo, as discordâncias são aniquiladas na região varrida pelo contorno.

Seis importantes variáveis influenciam o comportamento da recristalização. São elas:

1. Quantidade de pré-deformação;
2. Temperatura;
3. Tempo;
4. Tamanho de grão inicial;
5. Composição e
6. Grau de recuperação ou poligonização anterior ao início da recristalização.

À medida que a temperatura na qual a recristalização ocorre depende das variáveis citadas, esta não é uma temperatura fixa, como uma temperatura de fusão. Para considerações práticas, a temperatura de recristalização pode ser definida como a menor temperatura na qual em uma dada liga, em estado altamente trabalhado a frio, aparecem grãos livres de tensão em um período de tempo de uma hora. Os fatores tamanho de grão, severidade da deformação plástica e presença de átomos de soluto ou partículas de segunda fase influenciam diretamente a temperatura de recristalização.

Como a força motriz para o crescimento de grão é apreciavelmente mais baixa do que a força motriz para a recristalização, o crescimento de grão irá ocorrer lentamente em temperaturas nas quais a recristalização ocorre imediatamente. Entretanto, o crescimento de grão é fortemente dependente da temperatura e será logo alcançada uma região de crescimento de grão na qual os grãos aumentam de tamanho muito rapidamente. O crescimento de grão pode ser consideravelmente inibido pela presença de uma fina dispersão de partículas de segunda fase, que restringem o movimento dos contornos de grão.

Neste experimento, será analisado o efeito do encruamento e do recozimento na dureza de amostras de latão e de cobre.

Sugestão de leitura: Callister Jr, W.D. "Materials Science and Engineering: An Introduction", J. Wiley & Sons. Seções sobre encruamento, recuperação, recristalização e crescimento de grãos.

Pré-teste:

Para o teste deverão ser estudados os seguintes tópicos:

- ✓ Definir encruamento e explicar como ele ocorre em materiais metálicos;
- ✓ Como as propriedades mecânicas e físicas são alteradas pelo encruamento?
- ✓ Descrever as alterações microestruturais oriundas da deformação plástica a frio;
- ✓ Definir recozimento (para recuperação e recristalização) de ligas metálicas esclarecendo seus objetivos;
- ✓ Como a temperatura e o tempo de recozimento (para recuperação e recristalização) afetam a microestrutura da liga metálica;
- ✓ Como o recozimento (para recuperação e recristalização) influencia as propriedades mecânicas?

OBS: **Estudar** os tópicos do **Callister** (Ciência e Engenharia de Materiais, uma introdução) que tratam do assunto.



FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - FEM/UNICAMP

Rua Mendeleev, 200 - CEP 13083-860

Cidade Universitária "Zeferino Vaz" Barão Geraldo

Campinas - SP www.fem.unicamp.br

Procedimento experimental:

Materiais empregados: cobre eletrolítico (pureza 99,9%) e latão CLA 360 (60-63% Cu; 35% Zn; 0,35% Fe; 0,3% Sn; 2,5-3,7% Pb). Serão fornecidas 5 amostras de cada material na condição recozida (550 °C por 1h e resfriamento em água).

Experimento 2a:

1. Medir a dureza do cobre (Rockwell F) e do latão (Rockwell B) após o recozimento.
2. Deformar as amostras plasticamente a frio por compressão. As amostras de cobre devem ter a altura reduzida em 10, 20, 30, 40 e 50%, enquanto as de latão, a altura será reduzida em 30%.
3. Lixar as amostras para reduzir imperfeições superficiais e medir a dureza;

Experimento 2b:

1. Recozer as amostras de cobre e latão em forno. As amostras de cobre devem ser recozidas à temperatura de 450 °C por 15 min, enquanto as amostras de latão devem ser recozidas à temperatura de 550 °C por 3, 7, 15, 30 e 60 minutos. Resfriar as amostras em água.
2. Lixar e medir a dureza de todas as amostras.

ATENÇÃO:

- ❖ CUIDADO NA MANIPULAÇÃO DE OBJETOS QUENTES.
- ❖ SEGURANÇA MÁXIMA PARA EVITAR O CONTATO COM METAL AQUECIDO.

Relatório:

Recomenda-se que o relatório seja dividido em seis (6) seções, organizadas da seguinte forma:

Obs: Todos os quesitos requeridos nos resultados e discussões devem ser respondidos e/ou realizados.

1. Introdução

2. Objetivos do experimento

3. Metodologia experimental

4. Resultados e discussões:

- a. Comparar a dureza das amostras de cobre com diferentes níveis de deformação e recozidas à temperatura de 450 °C por 15 min. Apresentar os resultados em formato de gráficos com os valores de média e desvio padrão.
- b. Baseado nos resultados encontrados, explique os mecanismos a partir do qual a dureza do cobre variou com os diferentes níveis de deformação aplicados e com o tratamento térmico posterior.
- c. Comparar a dureza das amostras de latão deformadas e recozidas à temperatura de 550 °C por 3, 7, 15, 30 e 60 minutos. Apresentar os resultados em formato de gráficos com os valores de média e desvio padrão.
- d. Baseado nos resultados encontrados, explique os mecanismos a partir do qual a dureza do latão variou com os diferentes tempos de recozimento aplicados.
- e. Discutir e relacionar os resultados obtidos com as etapas de recuperação, recristalização e crescimento de grão.

5. Conclusões

6. Referências bibliográficas