

ANÁLISE DA EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL DO COBRE DEFORMADO A QUENTE ATRAVÉS DE PROCESSOS DE TORÇÃO CÍCLICA E MONOTÔNICA¹

Ivete Peixoto Pinheiro⁽²⁾
Deise Marina da Rocha Matos⁽³⁾
Paulo Roberto Cetlin⁽⁴⁾

Resumo

A conformação a quente dos metais e ligas metálicas visa dar forma ao produto, sendo também responsável pela microestrutura do material e conseqüentemente, suas propriedades mecânicas. O estudo do caminho de deformação na conformação a quente tem mostrado que, dependendo da trajetória de processo, ocorrem mudanças nas propriedades mecânicas. Entretanto, o estudo microestrutural tem sido ainda um assunto pouco explorado. O estudo da influência do caminho de deformação abordado neste trabalho está focado na evolução microestrutural durante os processos de conformação mecânica a quente. O cobre foi usado como material modelo para análise microestrutural, uma vez que o resfriamento brusco deste não proporciona mudança de fase, como ocorre para o aço. A deformação a quente foi realizada através de ensaios monotônicos (contínuos) e cíclicos. Verificase a evolução microestrutural através do congelamento de amostras com diferentes níveis de deformação total. Os ensaios de torção foram realizados numa máquina servohidráulica MTS, com controle e aquisição de dados através do controlador TESTSTAR 2. As condições de ensaio utilizadas foram: temperatura de 400°C e taxa de deformação de 0,1s⁻¹. As amostras foram congeladas instantaneamente através de injeção de água dentro do forno. Realizou-se análise microestrutural óptica na seção longitudinal superficial do corpo de prova, onde foi verificado que as microestruturas obtidas nos ensaios cíclicos apresentam diferenças acentuadas quando comparadas com as do ensaio monotônico.

Palavras-chave: Caminho de deformação; Deformação cíclica; Torção; Cobre.

¹ Contribuição técnica a ser apresentada no 60º Congresso Anual da ABM, 25 a 28 de julho de 2005, Belo Horizonte - MG

² Dra., Profa. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Mecânica, Belo Horizonte. ivetepinheiro@deii.cefetmg.br.

³ Bolsista BIC Júnior, aluna do Ensino Médio da Escola Estadual Maurício Murgel, Belo Horizonte. deise.marina@bol.com.br

⁴ Dr., Prof. Titular do Departamento Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG, Belo Horizonte. pcetlin@demet.ufmg.br.

1 INTRODUÇÃO

A maioria dos produtos metalúrgicos usados no nosso dia a dia foi submetida a processos de conformação mecânica a quente. A laminação controlada representou um grande avanço tecnológico, onde através do controle das variáveis de processo (temperatura, taxa de deformação, nível de deformação, tempo entre passes) foi possível obter o refino dos grãos⁽¹⁾. Atualmente vem sendo explorada outra importante variável de processamento, denominada caminho de deformação.

Vários trabalhos relatam o efeito de alterações no caminho de deformação na conformação a frio e a quente^(1, 2, 3, 4). Estes trabalhos abordam o fenômeno através da análise das curvas de escoamento bem como através dos processos de recristalização estática subsequentes à deformação a frio⁽⁵⁾.

As deformações cisalhantes das placas laminadas, devido à mudança de direção da força de atrito que age na superfície da chapa, em função da posição dessa em relação aos cilindros laminadores⁽⁶⁾, não contribuem para mudança de forma. Entretanto, afetam o caminho de deformação e, conseqüentemente, a microestrutura. No processamento de não planos, o efeito do caminho de deformação é ainda mais significativo, devido à mudança de direção da deformação entre passes sucessivos, carregamento conhecido como deformação multiaxial seqüencial^(7, 8).

O estudo do caminho de deformação devido à deformação cisalhante nos processo de laminação é muito complexo. Entretanto, pode-se estudar parcialmente os fenômenos aí envolvidos através de simulações em laboratório utilizando o ensaio de torção. O teste de torção tem sido usado por mais de 30 anos como meio de medir a capacidade de trabalho a quente em metais e ligas metálicas, bem como sua evolução microestrutural^(9, 10, 11, 12, 13).

O objetivo do presente trabalho foi analisar o efeito de mudanças no caminho de deformação (torção monotônica ou cíclica com amplitudes de deformação ($\Delta\varepsilon$) de 0,05) através de uma análise microestrutural. O cobre foi usado como material modelo, uma vez que o resfriamento brusco deste não proporciona mudança de fase, como ocorre para o aço. O cobre possui estrutura CFC de baixa energia de falha de empilhamento e apresenta recristalização dinâmica quando submetido a trabalhos de deformação monotônica a quente, levando à típica curva tensão x deformação com pico.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O material utilizado no trabalho foi o cobre comercialmente puro, cuja composição química é apresentada na Tabela 1 (percentuais em peso).

Tabela 1. Composição química do cobre comercialmente puro - percentuais em peso.

Sn	Pb	Fe	Zn	Ni	P	Al	Mg	Si	O
< 0,10	<0,010	0,010	0,0035	< 0,002	0,026	< 0,03	< 0,001	0,024	0,017

A análise metalográfica mostrou que o material recebido estava encruado, apresentando superficialmente grãos alongados no sentido longitudinal da barra. Para homogeneizar a microestrutura e eliminar o encruamento superficial produzido durante a usinagem, os corpos de prova (CPs) do cobre foram inicialmente recozidos a 570°C durante 90 minutos, em vácuo de $1333 \times 10^{-5} \text{Pa}$ (10^{-4}Torr). Os corpos de prova cilíndricos foram usinados com diâmetro de 6,35mm e comprimento útil de 15,0mm, guardando uma relação de comprimento/diâmetro de 2,36. Os CPs foram medidos através de um projetor de perfil do tipo Mitutoyo modelo PJ-311A. Antes de iniciar o ensaio de torção o corpo de prova foi aquecido a 570°C durante 30 minutos imediatamente antes de processar o ensaio, seguido de resfriamento com uma taxa de 1°C/s até a temperatura indicada para a realização da torção, permanecendo nessa temperatura durante 3 minutos, de tal forma a se conseguir homogeneização térmica através da seção do corpo de prova.

Os ensaios de torção foram realizados em uma máquina de torção MTS, servohidráulica, com controle e aquisição de dados através do controlador TESTSTAR 2. A máquina de torção possui um forno radiante com lâmpadas de tungstênio controlado por um microprocessador. O controle de temperatura foi realizado através de um termopar em contato com a parte útil do corpo de prova. Uma atmosfera de argônio foi usada durante a realização dos testes com o objetivo de evitar oxidação superficial do corpo de prova. O argônio era injetado em fluxo contínuo dentro do tubo de quartzo que envolvia a amostra (Figura 1).

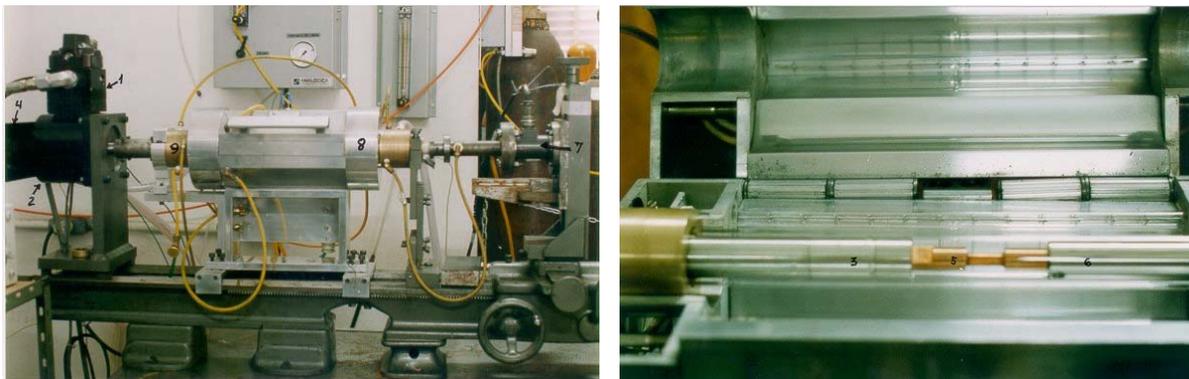


Figura 1. (a) Máquina de torção; (b) Forno aberto mostrando o posicionamento do corpo de prova, dentro do tubo de quartzo, para realização do ensaio de torção.

Realizaram-se ensaios de torção monotônica ou contínua (um único sentido) e ensaios de torção cíclica (sentido horário, depois no sentido anti-horário e assim sucessivamente). Os dados obtidos de torque e deformação angular foram convertidos em tensão equivalente e deformação equivalente através do critério de von Mises, levando em consideração as dimensões de cada CP. Nos ensaios cíclicos as curvas de tensão equivalente x deformação equivalente foram obtidas através da deformação acumulada, que é a soma das deformações de cada ciclo em valor absoluto; foi usado também o valor absoluto da tensão. O tempo para reversão do sentido de torção da máquina foi de 0,1 a 0,3 segundos, sendo determinado que neste intervalo de tempo o amaciamento estático entre os ciclos é desprezível.

Uma das dificuldades encontradas no estudo detalhado do caminho de deformação a quente é o congelamento da microestrutura existente em qualquer momento do ensaio para análise microestrutural, procurando manter a microestrutura e

subestrutura presentes. No caso da deformação a quente, é necessário que os eventuais efeitos de restauração estática, após a interrupção do ensaio, sejam eliminados. Caso contrário, os aspectos observados podem ser afetados pelos fenômenos de recuperação estática após a deformação.

McQueen ⁽¹⁴⁾ analisou o problema de resfriamento para o cobre OFHC; usando elevadas temperaturas (800-900°C) e elevadas taxas de deformação (3,7-11,1s⁻¹). Foi verificado que para as amostras onde era interrompida a deformação a quente e em seguida realizado o resfriamento com água de 900°C até 100°C em tempo inferior a 3s, ocorria a recristalização estática. Somente foi possível congelar as microestruturas quando o resfriamento iniciava-se antes de interromper a deformação. Nesse caso foi possível observar no microscópio óptico os grãos recristalizados dinamicamente, que apresentavam intensa subestrutura.

Usou-se o método proposto nos trabalhos de Petkovic et al. ⁽¹⁵⁾ (utilizando a tensão de fluxo) para examinar o comportamento do amaciamento durante os intervalos de conformação a quente. Foi verificado em experimentos exploratórios prévios que, na torção do cobre comercialmente puro, interrupções de deformação da ordem de 1s, à temperatura de 500°C e velocidade de deformação 0,1s⁻¹, já apresentavam amaciamento apreciável, devido às recristalizações metadinâmica e estática.

O projeto do sistema de resfriamento rápido foi realizado visando congelamento imediato dos corpos de prova submetidos ao ensaio de torção a quente, através da introdução de água dentro do tubo de quartzo que envolve o corpo de prova (figura 1 (b)). Através de programas específicos de torção (“templates” da MTS), o relé desligava o forno e abria a válvula solenóide para entrada de água. A interrupção do ensaio foi realizada no momento exato em que a água atingiu o corpo de prova.

Para a análise da evolução microestrutural realizou-se o congelamento de amostras com diferentes níveis de deformação total, todas as interrupções da torção cíclica foram realizadas após o ciclo positivo. O ataque metalográfico foi realizado por aplicação com uma solução de 65ml de ácido sulfúrico concentrado, 16g de dicromato de potássio, 3g de cloreto de sódio e 800ml de água destilada, chamado de reagente Di Cobre.

3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Foram realizados vários ensaios para determinar a velocidade de resfriamento do corpo de prova. As taxas de resfriamento interna e superficial do mesmo foram determinadas utilizando-se uma amostra de cobre com furo no centro. O corpo de prova possuía dois termopares, um no furo central e outro em contato com a parte útil do mesmo. A figura 2 mostra as curvas de resfriamento e o cálculo das taxas de resfriamento a partir da temperatura de 400°C.

A microestrutura obtida após tratamento térmico de homogeneização é apresentada na fotomicrografia da figura 3 mostrando grãos equiaxiais e maclas de recozimento.

A melhor condição para análise dos ensaios de torção monotônica à temperatura de 400°C foi com taxa de deformação de 0,1s⁻¹. A curva encontrada na figura 4(a) é característica dos processos que sofrem recristalização dinâmica na conformação a

quente, verifica-se pico bem definido e baixo nível de oscilação de tensão após obtenção do estado estacionário. Foi possível determinar o ponto crítico ($\sigma_c = 152,68\text{MPa}$ e $\varepsilon_c = 0,68$) e o ponto de pico ($\sigma_p = 158,66\text{MPa}$ e $\varepsilon_p = 0,89$). Para uma deformação maior que 1,2, a recristalização dinâmica encontrava-se completamente desenvolvida (regime estacionário) ^(6, 16).

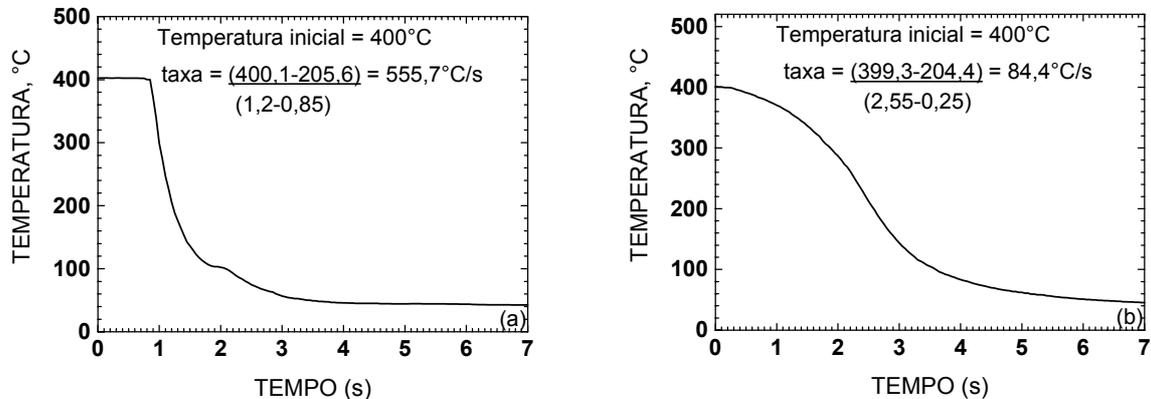


Figura 2. Curvas de resfriamento acelerado e cálculo das taxas de resfriamento a partir da temperatura de 400°C com o uso do corpo de prova de cobre possuindo furo central: (a) superficial e (b) interna.

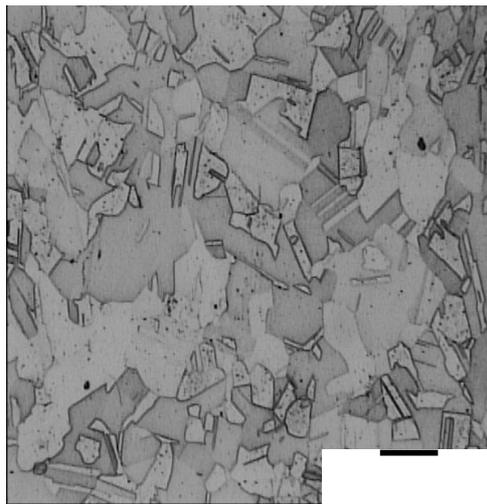


Figura 3. Fotomicrografia óptica da seção longitudinal superficial do corpo de prova após tratamento térmico de homogeneização. Ataque por aplicação com solução Di Cobre.

As fotomicrografias obtidas na seção longitudinal e superficial dos corpos de prova após realização dos ensaios de torção monotônica são apresentadas na Figura 4 (b) -(e). A microestrutura obtida na Figura 4 (b), deformação de 0,3, conserva ainda o aspecto do material recozido. Nota-se a presença de precipitados de óxido de cobre e os grãos encontram-se na forma equiaxial. Com o aumento da deformação equivalente total (0,9), correspondente à deformação de pico, a microestrutura apresentada na Figura 4 (c) difere muito da inicial. Não foi verificada a presença de maclas, ocorreu a presença de grãos alongados (grãos iniciais ainda não recristalizados) com direção preferencial de 45° com o eixo do corpo de prova e pequenos grãos recristalizados (mais claros). A microestrutura mostra, portanto, que o processo de recristalização dinâmica já havia iniciado.

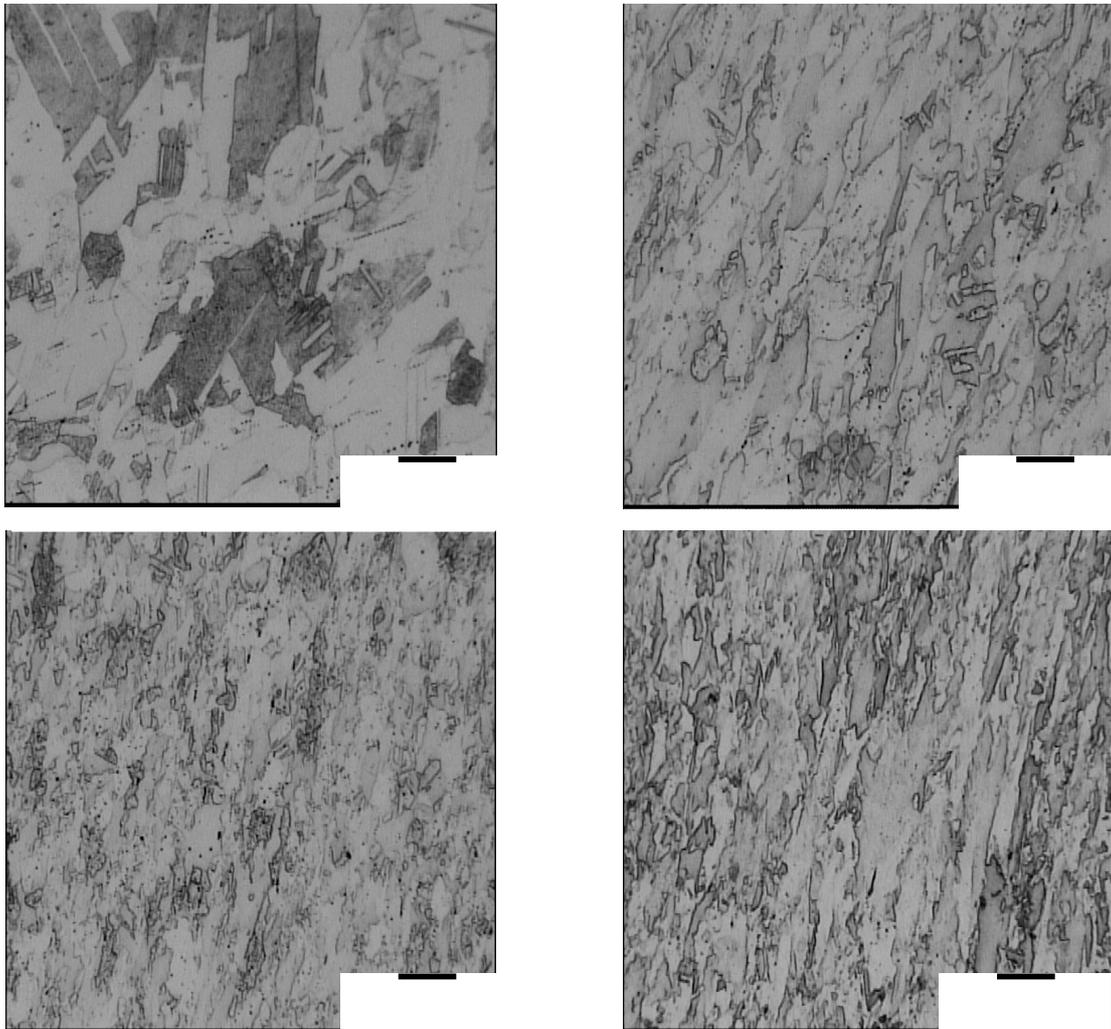
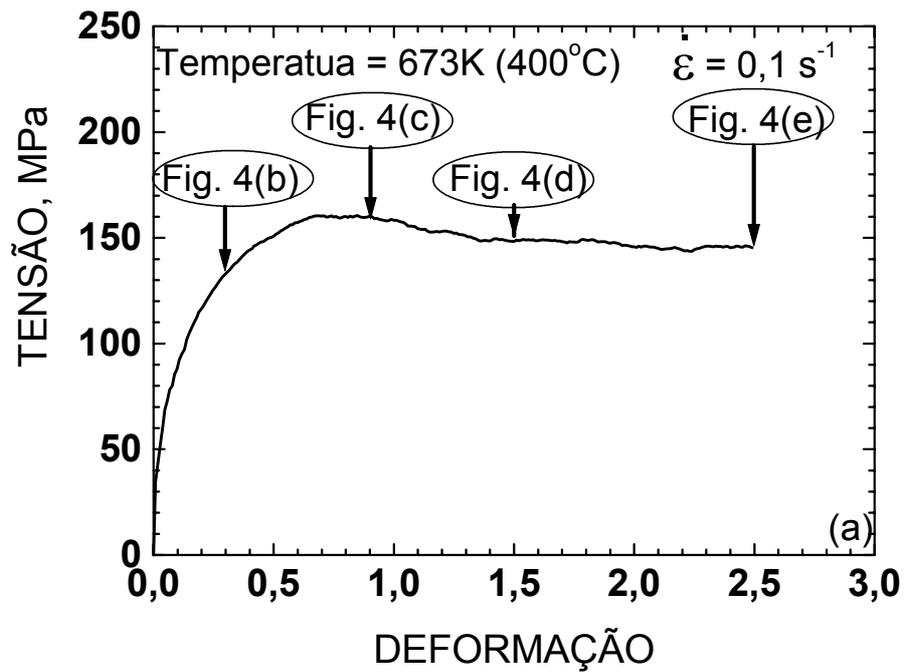


Figura 4. (a) Curva tensão equivalente x deformação equivalente para o ensaio de torção monotônica do cobre ($T = 400^{\circ}\text{C}$ e taxa de deformação $= 0,1\text{s}^{-1}$). Fotomicrografias da seção longitudinal superficial do CP com diferentes níveis de deformação total: b) 0,3; c) 0,9; d) 1,5 e e) 2,5. Ataque por aplicação com Di Cobre.

Com a deformação de 1,5 a recristalização dinâmica encontrava-se já em regime (estado estacionário). Na Figura 4 (d) constatou-se a presença de grãos recristalizados dinamicamente. Os grãos menores e com contorno bem definidos são os pequenos grãos recristalizados que ainda não possuem uma subestrutura, enquanto os outros (fundo) são grãos recristalizados, mas já com intensa subestrutura. A fotomicrografia após deformação de 2,5 é apresentada na Figura 4 (e). Verificou-se a presença de pequenos grãos recristalizados numa matriz de cobre com subestrutura. Foi constatado que, com o processo de recristalização ocorreu um refino de grão, como nos trabalhos de Petkovic ⁽¹⁵⁾ e McQueen ⁽¹⁴⁾. Observou-se a presença de grãos alongados na direção de 45° com o eixo do corpo de prova, direção de intenso cisalhamento promovido pelo ensaio de torção.

A Figura 5 (a) mostra a curva de tensão equivalente x deformação equivalente para o ensaio de torção cíclica, usando a amplitudes de 0,05. A curva obtida para o ensaio de torção monotônica na mesma condição de temperatura e taxa de deformação encontra-se em linha pontilhada, para facilitar a comparação com o ensaio cíclico. Verifica-se que com a deformação cíclica, ocorreu o desaparecimento do pico de recristalização dinâmica. Pode-se observar também que ocorre uma diminuição na tensão de saturação da torção cíclica (σ_{ss}^c). Essa observação já havia sido realizada por Armstrong ⁽⁷⁾ para a compressão multidirecional do alumínio 1100 à temperatura ambiente e nas curvas de fluxo de compressão múltipla do chumbo ($T = -25^\circ\text{C}$ e taxa de deformação = $2,65 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$) no trabalho de Zhang ⁽⁶⁾.

As fotomicrografias ópticas das seções longitudinais e superficiais dos CPs submetidos aos ensaios de torção cíclica são apresentadas na Figura 5 (b) – (e). As condições para realização dos ensaios foram mantidas iguais às da torção monotônica ($T = 400^\circ\text{C}$, taxa de deformação = $0,1 \text{s}^{-1}$) e com amplitude de deformação de 0,05. Não foram observadas mudanças através da microscopia óptica, ou seja, o material parece não ter sofrido deformação. As maclas de deformação da amostra recozida ainda foram detectadas. Os grãos mantêm sua forma equiaxial e, visualmente, se apresentam do mesmo tamanho. Nesses ensaios cíclicos, o processo de restauração dominante foi o de recuperação dinâmica.

4 CONCLUSÃO

A torção monotônica do cobre ($T = 400^\circ\text{C}$, taxa de deformação = $0,1 \text{s}^{-1}$ e $\varepsilon = 2,5$) apresenta curva de fluxo característica do processo de recristalização dinâmica. A análise microestrutural confirmou a presença deste fenômeno, através da presença de pequenos grãos recristalizados e do refino generalizado da microestrutura.

No caso da torção cíclica para a amplitude de deformação ($\Delta\varepsilon$) = 0,05 predomina a recuperação dinâmica, as curvas de fluxo não apresentam o pico de recristalização dinâmica e a microestrutura óptica inicial não se altera com a deformação.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e PRONEX (Programa de Núcleos de Excelência) pelo apoio financeiro e à FAPEMIG/ CNPQ (através do Convênio TEC 10.31/03) pelo apoio através da bolsa de iniciação científica BIC Júnior.

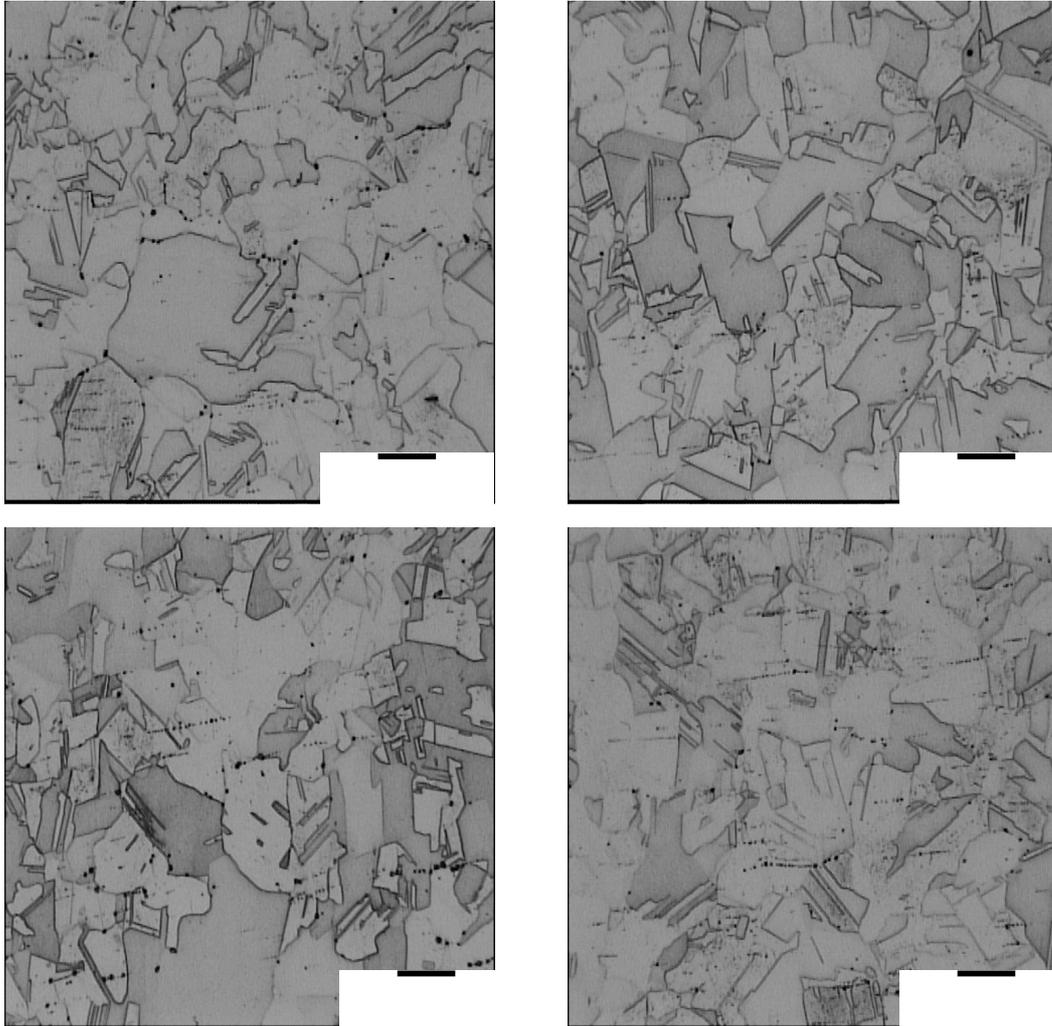
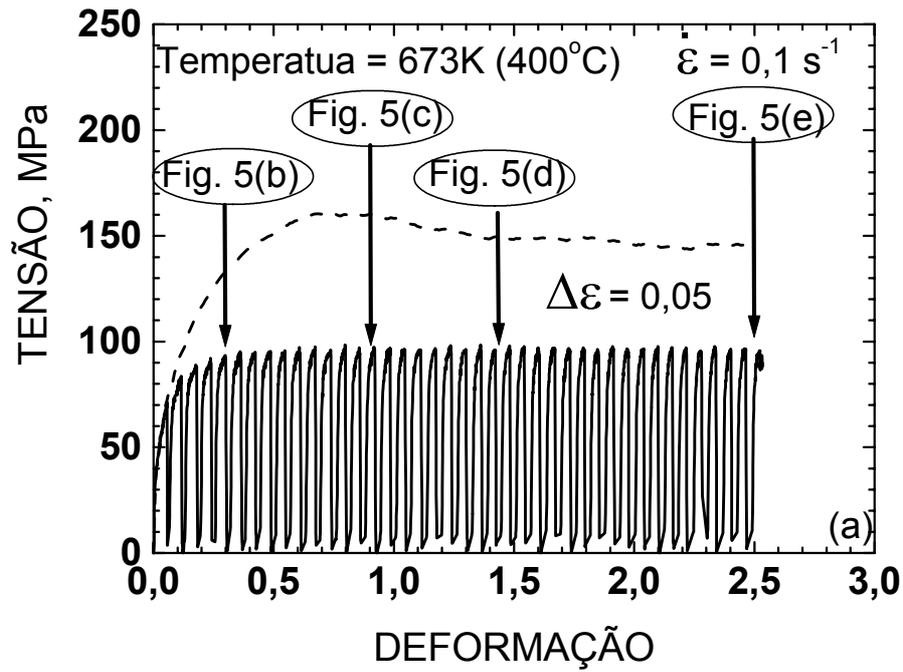


Figura 5. (a) Curva tensão equivalente x deformação equivalente para o ensaio de torção cíclica do cobre ($T=400^{\circ}\text{C}$, taxa de deformação = $0,1\text{s}^{-1}$ e $\Delta\varepsilon = 0,05$). Fotomicrografias da seção longitudinal e superficial do CP com diferentes níveis de deformação total: b) 0,3; c) 0,9; d) 1,5 e e) 2,5. Ataque por aplicação com Di Cobre.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 McQUEEN, H. J.; JONAS, J. J. Recovery and recrystallization during high temperature deformation. **Treatise on Materials Science and Technology, Plastic Deformation of Materials**, San Francisco Academic Press, v. 6, p. 393-493, 1975.
- 2 COFFIN, L. F.; TAVERNELLI, J. F. The cyclic straining and fatigue of metals. **Transactions of the Metallurgical Society of AIME**, v. 215, p. 794-807, 1959.
- 3 PINHEIRO, I. P.; Barbosa, Ronaldo; CETLIN, P. R. Restauração dinâmica e evolução microestrutural do cobre deformado a quente por torção cíclica e monotônica: CONGRESSO ANUAL – ABM, 59, 2004, São Paulo. **Anais...São Paulo**. ABM, 2004. p. 3314 - 3323. 1 CD.
- 4 CETLIN, P.R.; CORRÊA, E.C.S; AGUILAR, M.T.P. The effect of the strain path on the work hardening of austenitic and ferritic stainless steels in axisymmetric drawing, **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 34 A, p.589 – 601, mar.2003.
- 5 LINDH, E. et. al. Effect of redundant deformation on recrystallization behaviour of copper. **Scripta Metallurgica et Materialia**, v. 29, p. 347-352, 1993.
- 6 ZHANG, X. J. **The effect of strain history on properties and structure of deformed metals**. 1998. 186f. Thesis (Doctor of Philosophy) - Department of Materials Engineering, Monash University, Clayton.
- 7 ARMSTRONG, P. E.; HOCKETT, J. E. Large strain multidirectional deformation of 1100 aluminum at 300 K. **J. Mech. Phys. Solids**, v. 30, n. 1/2, p. 37-58, 1982.
- 8 DAVENPORT, D.J.; HIGGINSON, M.F. Strain path effects under hot working: an introduction **Journal of Materials Processing Technology**, v. 98, p. 267-291, 2000.
- 9 DIETER, G. E. **Workability testing techniques**. Ohio: American Society for Metals, 1984, 294 p.
- 10 MACCAGNO, T. M.; JONAS, J. J. Correcting for the effects of static and metadynamic recrystallization during the laboratory simulation of rod rolling. **ISIJ International**, v. 34, n. 7, p. 607-614, 1994.
- 11 MACCAGNO, T. M.; YUE, S.; JONAS, J. J.; DYCH, K. Simulated hot working, cold working, and annealing of Al-containing steels. **Metallurgical Transactions A**, v. 24A, p.1589-1596, 1993.
- 12 TEGART, W. J. McG. **Elements of mechanical metallurgy**. New York:MacMillan Company, 1967, 259 p.
- 13 JONAS, J.J.; MACCAGNO, T.M.; YUE,S. The role of dynamic recrystallization in industrial hot working. In: ANNUAL CIM CONFERENCE OF METALLURGISTS, 34, 1995, Vancouver. **Proceedings...** Vancouver, 1995.
- 14 McQUEEN, H. J.; BERGERSON, S. Dynamic recrystallization of copper during hot torsion. **Metal Science Journal**, v. 6, p. 25-29, 1972.
- 15 PETKOVIC, R. A.; LUTON, M. J.; JONAS, J. J. Recovery and recrystallization of polycrystalline copper after hot working. **Acta Metallurgica**, v. 27, p. 1633-1648, 1979.
- 16 BARTOLOMÉ, R.; GUTIÉRREZ, I.; FUENTES, M. Effect of the strain reversal on the recrystallization of a microalloyed steel. In: THE FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECRYSTALLIZATION AND RELATED PHENOMENA, July 1999, Tsukuba, Japan, Japan Institute of Metals. **Proceedings...** Tsukuba: T. Sakai; H. G. Suzuki (ed.), 1999. p. 709-714.

ANALYSIS OF THE MICROSTRUCTURAL EVOLUTION OF COPPER IN HOT MONOTONIC AND CYCLIC TORSION⁽¹⁾

Ivete Peixoto Pinheiro⁽²⁾
Deise Marina da Rocha Matos⁽³⁾
Paulo Roberto Cetlin⁽⁴⁾

Abstract

Hot working of metals and alloys imparts specific shapes to parts and simultaneously affect the microstructures and properties of these materials. Changes in the strain path employed in the processing are associated with modifications in the final mechanical properties of the material. On the other hand, the attendant microstructural aspects have not received as much attention as the analysis of the changes in the properties. The present report is centered on the microstructural evolution of metals during hot working. Copper was utilized as a model material, since its rapid cooling after working does not cause phase changes, as observed in steels. Straining was performed monotonically and cyclically. The microstructural evolution was followed by quenching samples at various deformation levels. Torsion tests were performed in a servohydraulic MTS machine, involving the control of the test and data acquisition through the TESTSTAR 2 system. Experiments were completed at 400°C and at strain rate of 0,1s⁻¹. Samples had their microstructures frozen through the injection of water in the quartz tube that surrounded the sample. Optical microstructural analysis were performed on a superficial, longitudinal section of the sample. Pronounced differences were found in the microstructures of the materials which were deformed cyclically or monotonically.

Key-words: Strain path; Cyclic strain; Torsion; Copper.

- (1) Technical paper to be presented of 60^o Annual Congress of the ABM, July/25 to 28/2004, São Paulo - SP.
(2) Dr., Associate Professor at the Federal Center of Technological Education of Minas Gerais, Department of Mechanics, Belo Horizonte. ivetepinheiro@deii.cefetmg.br.
(3) Student assistant, Escola Estadual Maurício Murgel, Belo Horizonte. deise.marina@bol.com.br
(4) Dr., Professor at the Federal University of Minas Gerais, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Belo Horizonte. pcetlin@demet.ufmg.br.