

INFLUÊNCIA DA TORÇÃO CÍCLICA NA ESTRUTURA DE DESLOCAÇÕES DO AÇO BAIXO CARBONO TREFILADO

M. T. P. Aguiar⁽¹⁾, E. C. S. Corrêa⁽¹⁾, W. A. Monteiro⁽²⁾; P. R. Cetlin⁽¹⁾
Rua Espírito Santo, 35, Centro, Belo Horizonte/MG, CEP 30.160-030
teresa@demc.ufmg.br

1 – Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte - MG - Brasil

2 – Instituto de Pesquisas Nucleares (IPEN), São Paulo - SP - Brasil

RESUMO

O comportamento mecânico de metais submetidos a deformações seqüenciais de natureza ou direção diferentes é comumente diferente do obtido em materiais deformados monotonicamente. Nessas situações, o processamento mecânico podem promover o amaciamento do metal. Trabalhos recentes mostram que a deformação cíclica aplicada a metais recozidos e trefilados, no final do processo ou entre passes sucessivos de trefilação, influencia o comportamento à tração dos metais estudados. Os resultados obtidos para barras de aço baixo carbono mostram que, para amostras recozidas, a deformação cíclica promove o aumento do limite de escoamento, e não afeta significativamente o limite de resistência e o alongamento. No caso de barras previamente trefiladas, a deformação cíclica causa uma diminuição dos limites de escoamento e de resistência, e um aumento do alongamento total. Neste trabalho é analisado o efeito das alterações no caminho de deformação na estrutura de deslocações de um aço baixo carbono (0,12%C). Algumas amostras recozidas foram submetidas à deformação cíclica. As restantes foram submetidas a duas diferentes seqüências de deformação: 1) trefilação em um ou dois passes; 2) deformação cíclica de barras pré-trefiladas em um ou dois passes. A análise por microscopia eletrônica de transmissão indica que amaciamento observado nas amostras trefiladas/torcidas estaria relacionado à constatação de que o recarregamento por torção cíclica de amostras pré-deformadas leva a uma reestruturação das deslocações.

Palavras chaves: deslocações, torção cíclica, trefilação, amaciamento por deformação.

INTRODUÇÃO

A conformação mecânica a frio dos metais comumente promove o endurecimento do material. A magnitude desse endurecimento depende da redução de área, da temperatura e da taxa de deformação imposta pelo processo, e, também, da forma pela qual o material é deformado. Mantidas todas as outras variáveis constantes, o encruamento de materiais submetidos a uma associação seqüencial de deformações plásticas em diferentes direções ou de naturezas distintas é diferente do causado por uma deformação monotônica. Alterando-se a forma pela qual o material é deformado pode-se alterar a taxa de encruamento ou até amaciar o metal (Armstrong et al., 1982; Backofen e

Ghosh, 1973; Coffin e Tavernelli, 1959, Laukonis e Ghosh, 1978; Longo e Reed-Hill, 1972; Polakowski e Palchoudhuri, 1954; Sillekens et al. 1991; Thomsen, 1983; Wagoner, 1982; Wilson et al. 1983).

Resultados recentes no Brasil (Aguilar et al, 2001; Cetlin et al., 1998; Corrêa et al., 2000) mostram que a deformação cíclica influencia de forma diferenciada o comportamento mecânico de barras de metal recozidas e trefiladas. Observa-se que o alumínio recozido e torcido ciclicamente apresenta maiores tensões de fluxo que o material apenas recozido. Em contraposição a esses resultados, a torção cíclica leva ao amaciamento do material processado por trefilação. A deformação cíclica amacia o aço trefilado em um e dois passes, enquanto tende a endurecer o material recozido. Os dados mostram que a curva tensão-deformação do material trefilado em dois passes e deformado por torção é similar, tanto quanto ao coeficiente de encruamento quanto aos valores de tensão, à curva do aço trefilado em um único passe. De forma similar ao alumínio 6063, na trefilação do aço em dois passes sucessivos, a torção cíclica tende a eliminar o encruamento produzido pelo segundo passe de trefilação. Observa-se, para ambos os materiais, que o limite de resistência tende a permanecer praticamente constante com a deformação cíclica, para o material recozido. No entanto, a torção cíclica aumenta consideravelmente o limite de escoamento das barras apenas recozidas. Para o material trefilado, o limite de resistência diminui com a aplicação da torção cíclica. O mesmo ocorrendo com o limite de escoamento, com exceção do caso do alumínio trefilado em um passe. Percebe-se que esse decréscimo é maior para o material trefilado em dois passes em todas as situações. Pode ser observado que para o material pré-deformado, ocorre um aumento do alongamento total, enquanto que para o recozido, ocorre um decréscimo.

Neste trabalho procura-se associar os efeitos acima descritos à estrutura de deslocamentos do aço baixo carbono.

MATERIAIS E MÉTODOS

O material usado nos experimentos foi o aço com 0,12%C, 0,47%Mn, 0,07%Si, 0,003%Sn, 0,01%Mo, 0,016%P e 0,013%S, na forma de barras cilíndricas de 6,4mm de diâmetro. O procedimento experimental consistiu em submeter amostras recozidas e pré-deformadas por trefilação em um e dois passes a deformações cíclicas por torção. Os efeitos do caminho de deformação foram avaliados através da análise da estrutura de deslocamentos do material.

Todos corpos de prova foram previamente recozidos de forma a anular os efeitos de possíveis tratamentos mecânicos ou térmicos realizados anteriormente. O recozimento foi realizado no vácuo, à temperatura de 850°C, durante 40 minutos. O material recozido apresentou uma dureza média de 122,6HV. Após o tratamento térmico as amostras foram trefiladas em um e dois passes em uma banca de trefilação Bestlé, utilizando-se feiras de carboneto de tungstênio com semi-ângulo de 8° e lubrificação intensa com bissulfeto de molibdênio. Foram empregadas diferentes feiras de modo que em cada passe sempre se tivesse uma redução em área de 20%. As torções foram feitas em um

torno mecânico especialmente adaptado para os testes. A deformação na torção foi de 11,2% em cada um dos 10 ciclos aplicados. Todos os experimentos ocorreram à temperatura ambiente, com taxa de deformação de $0,002s^{-1}$ (Longo e Reed-Hill, 1972). As amostras após deformação foram armazenadas em temperaturas inferiores a $0^{\circ}C$ de forma a se evitar o envelhecimento por deformação.

A análise estrutural após cada trajetória de deformação foi realizada em um microscópio eletrônico de transmissão (JEOL, JEM – 200kV). Para a análise foram retiradas amostras de 3mm a partir da seção transversal das barras metálicas. Essas amostras foram submetidas a polimento eletrolítico com ácido perclórico e etanol, à temperatura ambiente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As subestruturas do material recozido e do trefilado em um e em dois passes são apresentadas nas figuras 1 e 2. Observa-se que material recozido apresenta baixa densidade de deslocações. No entanto, o trabalho mecânico altera acentuadamente essa densidade. A trefilação promove o desenvolvimento de uma estrutura celular alinhada, que apresenta tamanho e espessura de paredes irregular. No interior das células identifica-se um denso emaranhado de deslocações. Para maiores deformações por trefilação o tamanho das células diminui, como era de se esperar.

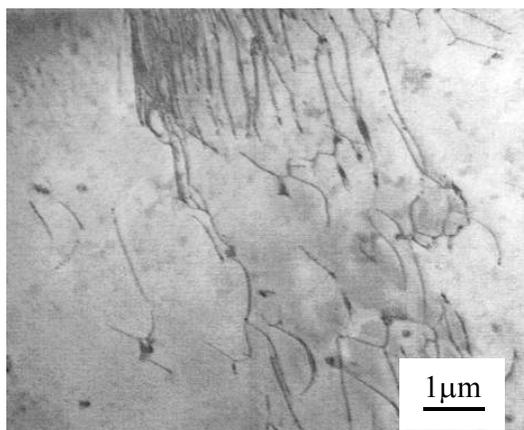
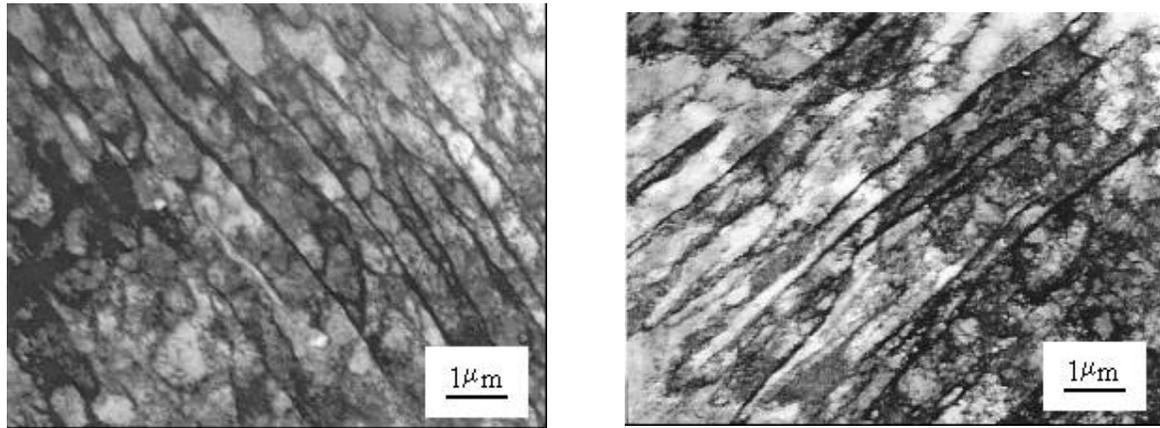


Figura 1. Fotomicrografia eletrônica de transmissão do aço recozido.

A morfologia da estrutura de deslocações desenvolvida pela torção cíclica (figura 3) é em linhas gerais similar à observada no material trefilado. No entanto as células tendem a ser maiores e a tendência ao paralelismo não é tão pronunciada.



(a)

(b)

Figura 2. Fotomicrografia eletrônica de transmissão do aço recozido e trefilado (8° e 20%) em (a) 1 passe, e (b) 2 passes.

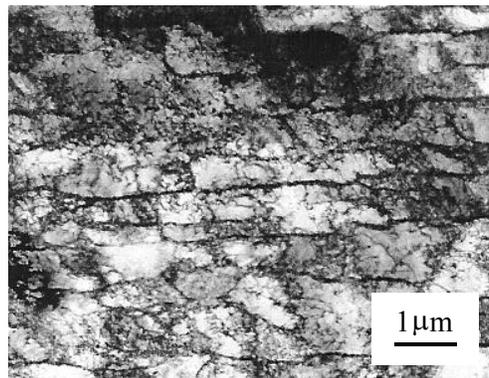


Figura 3. Fotomicrografia eletrônica de transmissão do aço recozido e torcido (11,2% de deformação em cada um dos 10 ciclos aplicados).

A análise da figura 4 indica que a estrutura alinhada de deslocações desenvolvida no material trefilado em um passe é substituída por uma estrutura em “mosaico” quando se tem torção cíclica subsequente. Com aplicação de deformação cíclica após trefilação em um passe ocorre o aumento do tamanho das células, a redução do alinhamento e células com menor densidade de deslocações no seu interior. O mesmo acontece com o material deformado em dois passes (figura 5). Neste caso, as células tendem a ser ainda maiores, tendo no seu interior mais baixa densidade de deslocações. As microestruturas indicam que a deformação cíclica tende a promover em várias regiões da amostra a aniquilação das deslocações emaranhadas levando a uma recuperação no material deformado. De

forma similar ao mecanismo que explica efeito Bauschinger (Dieter, 1981), essa aniquilação poderia ser decorrente das deformações aplicadas em direções opostas durante a deformação cíclica.

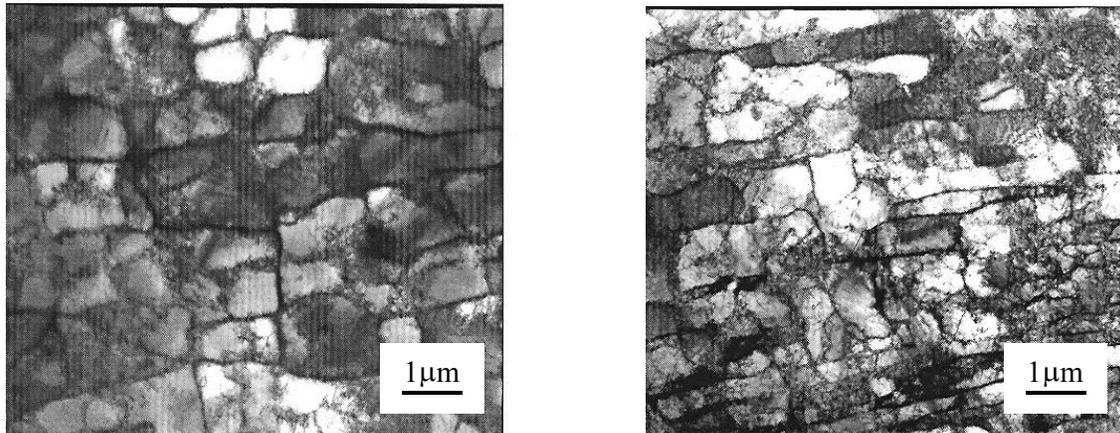


Figura 4 - Fotomicrografias eletrônicas de transmissão de diferentes regiões do aço trefilado em 1 passe (8° e 20%), e torcido ciclicamente (11,2% de deformação em cada um dos 10 ciclos aplicados).

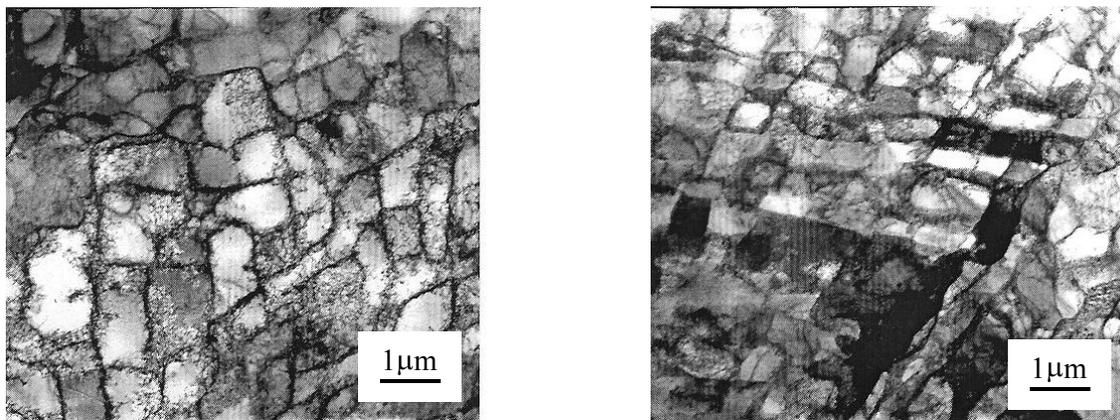


Figura 5 - Fotomicrografias eletrônicas de transmissão de diferentes regiões do aço trefilado em 2 passes (8° e 20%), e torcido ciclicamente (11,2% de deformação em cada um dos 10 ciclos aplicados).

Considerando a relação entre a tensão de escoamento Γ , e a densidade de deslocação ρ (Dieter, 1981):

$$\Gamma \propto \rho^{1/2} \quad (1)$$

é de se esperar que o material trefilado ou torcido tenha tensões de fluxo superiores à do material apenas recozido. Por outro lado, a recuperação promovida nos trefilados pela deformação cíclica

deve estar relacionada a menores tensões de escoamento. No caso do material deformado duplamente por trefilação, a deformação cíclica tende a ser mais eficaz no tocante ao amaciamento, produzindo uma estrutura mais refinada do que o material trefilado em um passe/torcido.

CONCLUSÕES

A deformação cíclica promove o amaciamento em material previamente deformado por trefilação, O comportamento mecânico observado está relacionado à constatação de que o recarregamento por torção cíclica de amostras pré-deformadas leva a uma reestruturação das deslocações.

A trefilação promove o desenvolvimento de uma estrutura celular alinhada de forma paralela. As células apresentam tamanho e espessura de paredes irregular, e possuem no seu interior um denso emaranhado de deslocações. A deformação cíclica promove um rearranjo da estrutura de deslocações, dissolvendo o emaranhado de deslocações do interior das células, que se tornam maiores e com paredes menos espessas, desaparecendo o paralelismo entre elas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguiar, M.T.P., Corrêa, E.C.S., Monteiro, W.A., Ferreira, N.A.M., Cetlin, P.R.. Work Softening of Drawn Low Carbon Steel Bars. **Materials Research**, 4 (2001) 87-91.
2. Armstrong, P. E., Hockett, J. E., Sherby, O. D. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, 30(1982) 37-58.
3. Backofen, W.A. Ghosh, A.K. Strain Hardening and Instability in Biaxially Stretched Sheets. **Metallurgical Transactions**, 4 (April 1973)1113-1123.
4. Cetlin, P.R., Aguiar, M.T.P., Corrêa, E.C.S., Valle, P.E., Rezende, J.L.L. Influence of Strain Path in the Mechanical Properties of Drawn Aluminium Alloy Bars. **Journal of Materials Processing Technology**, 80 – 81(1998) 376 – 379.
- 5 - Corrêa, E. C. S , Aguiar, M.T.P , Monteiro, W. A. , Cetlin, P. R. Work Hardening Behavior of Prestrained Steel in Tensile and Torsion Tests. **Journal of the Materials Science Letters**, v 19, p 779 - 781, 2000.
6. Coffin, L.F., Tavernelli, J. F. The Cyclic Straining and Fatigue of Metals. **Trans. Met. Soc. AIME**, 215 (1959) 784-807.
- 7 - Dieter, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 653p.
8. Laukonis, J.V., Ghosh, A.K. Effects of Strain Path Changes on the Formability of Sheet Metals. **Metallurgical Transactions**, 9A (1978)1849-1856.

9. Longo, W.P., Reed-Hill, R.E. Work Softening in Dynamic Strain Aged Low Carbon Steel. **Scripta Metallurgica**, 6, nº 9 (1972) 833-836.
10. Polakowski, N.H., Palchoudhuri, A. Softening of Certain Cold-Worked Metals under the Action of Fatigue Loads. **Proc. ASTM**, 54 (954) 701-716.
10. Sillekens, W.H., Dautzenberg, J.H., Kals, J.A.G. Strain Path Dependence of Flow Curves. **Annals of the CIRP**, 40 (1991) 255-258.
11. Thomsen, E.G. Stress-Strain Properties of Tough-Pitch Copper After Multi-Pass Drawing and Extruding. **Transactions of the ASME - Journal of Engineering Materials and Technology**, 105 (1983)178-181.
12. Wagoner, R.H. Plastic Behavior of 70/30 Brass Sheet. **Metallurgical Transactions**, 13A (1982)1491-1500.
13. Wilson, D. V., Zandrahmi, M., Roberts, W. T. Effects of Changes in Strain Path on Work Hardening in CP Aluminium and an Al-Cu-Mg Alloy. **Acta Metallurgica et Materialia**, v. 38, n. 2, p. 215-226, 1983.

THE EFFECT OF CYCLIC TORSION ON THE DISLOCATION STRUCTURE OF DRAWN MILD STEEL

M. T. P. Aguilar⁽¹⁾, E. C. S Corrêa⁽¹⁾, W. A. Monteiro⁽²⁾; P. R. Cetlin⁽¹⁾
Rua Espírito Santo, 35, Centro, Belo Horizonte/MG, CEP 30.160-030
teresa@demc.ufmg.br
1 - Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte - MG - Brazil
2 – Institute for Energy Researches (IPEN), São Paulo - SP - Brazil

ABSTRACT

The work hardening behavior of metals subject to complex processing paths is different from that in monotonic deformation. In the literature, the results show that, after some initial hardening, there is a possibility that further deformation will cause softening in the material ("work softening"). Recent work showed that cyclic torsion could be applied to drawn products, either at the end of the process or between successive stages, in order to change the processing strain path and to control the final properties of the products. The results indicate that cyclic pre-straining causes changes in the subsequent tensile behavior of low carbon steel, and that the effect will depend on the previous "history" of the material. For annealed samples, the cyclic torsion leads to an increase in the yield strength, but does not affect the tensile strength and elongation. For the case of previously drawn bars, the cyclic deformation caused a decrease in the yield and tensile strength and an increase in the

total elongation. The present paper discusses the dislocation structure changes associated with different strain paths in mild steel (0,12%C). A few annealed samples were directly submitted to cyclic torsion. The remaining ones were processed in two different deformation sequences: 1) drawing in one or two passes; 2) pre-drawn bars in one or two passes were deformed by cyclic torsion. The samples were drawn in a hydraulic draw bench. The dislocation structures resulting from the different strain paths were examined through Transmission Electron Microscopy.

Keywords: dislocation structures, cyclic torsion, drawing, strain path.