

Influência do cromo no envelhecimento após deformação em fios de aço perlítico trefilados

Wagner Custódio de Oliveira

Eng. Mecânico, PUC-Minas, Mestre em Engenharia Metalúrgica/Metalurgia Física, CPGEM-UFMG, aluno de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, CPGEM-UFMG. E-mail: wcobol@bol.com.br

Leandro Aparecido Marchi

Eng. Mecânico, UFMG, aluno de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, CPGEM-UFMG. E-mail: lmarchi@demet.ufmg.br

Berenice Mendonça Gonzalez

Física, ICEx-UFMG, Mestre em Engenharia Metalúrgica/Metalurgia Física, CPGEM-UFMG, Docteur d'Université, Université Louis Pasteur de Strasbourg, França, professora adjunta do Departamento de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Minas Gerais. E-mail: gonzalez@demet.ufmg.br

Resumo

A influência da adição de cromo no envelhecimento após deformação foi estudada em dois aços perlíticos stelmorizados e trefilados para uma redução de área de 86%, contendo um dos aços, 0,25% de cromo em sua composição química. Foram observados dois estágios de envelhecimento no intervalo de temperatura de tratamento considerado para cada aço. O mecanismo responsável pelo envelhecimento no primeiro estágio foi o ancoramento de deslocações por átomos de nitrogênio e carbono em solução sólida na ferrita. O segundo estágio foi associado ao ancoramento de deslocações em células nas interfaces ferrita-cementita. O efeito do cromo foi a diminuição no espaçamento interlamelar da perlita, o que intensificou os efeitos do envelhecimento nas propriedades mecânicas. Não foram observadas diferenças significativas nos valores da energia de ativação entre os aços no segundo estágio de envelhecimento, significando que pelo menos para o teor investigado, 0,25%, o cromo não afetou a estabilidade da cementita.

Palavras-chave: aços perlíticos ao cromo, envelhecimento após deformação.

Abstract

The influence of addition of chromium in the strain aging were studied in two stelmorized pearlitic steels, after drawing to an area reduction of 86%, contains one of the steels, 0,25% of chromium in the chemical composition. Two stages of strain aging were observed for both steels in the treatment temperature interval considered. The mechanism responsible for the strain aging in the first stage was the locking of dislocations by nitrogen and carbon atoms in solid solution in the ferrite. The second stage of aging was associated with dislocation locking in the ferrite/cementite interfaces. The effect of chromium was the reduction of the pearlitic interlamellar spacing, increasing the intensity of the strain aging effects in the mechanical properties. No significant differences were observed in the activation energy for the second of aging, meaning that at least for the investigated amount, 0,25%, chromium does not affect the stability of cementite.

Keywords: pearlitic steels at the chromium, strain aging.

1. Introdução

É bem estabelecido que o envelhecimento após deformação compromete a ductilidade dos aços ao mesmo tempo em que eleva sua resistência e dureza. A ocorrência do envelhecimento após deformação na trefilação de aços perlíticos pode acarretar fraturas durante o processo ou induzir a ocorrência de delaminação (Van Raemdonck et al., 1994). Portanto o conhecimento da influência da composição química e da microestrutura no processo viabiliza a minimização dos seus efeitos indesejáveis na trefilação ou a utilização otimizada de seu potencial como mecanismo de aumento de resistência.

Assim, o envelhecimento após deformação em aços perlíticos trefilados tem sido objeto de vários estudos (Yamada, 1976, Kemp et al., 1990, Watté et al., 1996, Delrue et al., 1997, Languillaume et al., 1997, Buono et al., 1998, Gonzalez et al., 1999, Su e Shemanski, 2000, Hinchliffe e Smith, 2001). A partir desses trabalhos ficou bem estabelecido que os aços perlíticos apresentam além do mecanismo clássico de envelhecimento associado à presença de carbono e nitrogênio em solução sólida na ferrita, como observado nos aços de baixo teor de carbono, outro estágio de envelhecimento, caracterizado por variações mais drásticas na resistência e ductilidade. Esse processo envolve o ancoramento de deslocações na ferrita por átomos de carbono provenientes da decomposição da cementita durante a deformação plástica.

Por outro lado, vários estudos mostraram que a adição de elementos de liga, como Ni, Co, Mn, Cr e V, tem um efeito importante na estabilidade da cementita em relação à deformação plástica, na medida em que alteram a entalpia de ligação carbono-deslocação. O efeito de 1,0% em peso de Cr ou Mn na energia de interação C-deslocação na ferrita foi estudado por Gridnev et al. (1980), concluindo que esses elementos aumentam a energia de interação C-deslocação na ferrita, elevando-a para 1,85eV. Assim, o resultado da adição de Cr ou Mn deve ser a desestabilização da cementita, o

que implicaria um aumento na quantidade de cementita decomposta com a deformação. Entretanto, de acordo com os resultados de Araújo et. al., (1992), que estudaram por espectroscopia Mössbauer a influência do acréscimo no teor de Mn de 0,5% para 0,9% na decomposição da cementita durante a trefilação de um aço perlítico, não houve variação na energia de ativação no segundo estágio de envelhecimento, confirmando que o acréscimo de 0,4% de Mn não foi suficiente para desestabilizar a cementita. Resultados semelhantes foram obtidos por Buono (1995), que também não observou mudança na energia de ativação no segundo estágio de envelhecimento de um aço perlítico trefilado para 86% de redução de área, com o aumento no teor de Mn de 0,45% para 0,70%.

Esse trabalho apresenta um estudo da influência da adição de cromo no envelhecimento após deformação, através da análise das variações nas propriedades mecânicas e da determinação dos parâmetros cinéticos, em dois aços perlíticos stelmorizados e trefilados para uma redução de área de 86%, contendo um deles 0,25% de cromo em sua composição química.

2. Materiais e métodos

Aço perlítico (1080) e aço perlítico ligado ao cromo (1080CR), ambos de procedência comercial e stelmorizados, foram recebidos na forma de fio máquina com diâmetro de 5,4mm. A composição química (% em peso) desses aços está especificada na Tabela 1.

A microestruturas dos aços stelmorizados foram caracterizadas por microscopia de força atômica (MFA), em amostras convencionalmente preparadas e atacadas com nital a 2% (Figura 1). Os valores do espaçamento interlamelar da perlita foram medidos nessas imagens conforme técnica descrita por Buono et al.(1997).

Os fios de aço foram trefilados para o diâmetro de 2,04mm em uma banca hidráulica de laboratório em nove passes individuais e consecutivos a uma velocidade de 0,25m/min. Foram utilizados como lubrificante pasta de bissulfeto de molibdênio e sabão em pó industrial. À saída da fieira, os fios foram refrigerados por um jato de óleo solúvel. Após o último passe de trefilação, foram cortadas amostras com 150mm de comprimento para envelhecimento e ensaio de tração.

Tabela 1 - Composição química (% em peso) dos aços perlíticos estudados.

Aço	C	Mn	Si	P	S	Cr	Al	N (ppm)
1080	0,85	0,49	0,20	0,009	0,009	-	0,002	36
1080CR	0,86	0,45	0,21	0,010	0,006	0,25	0,002	26

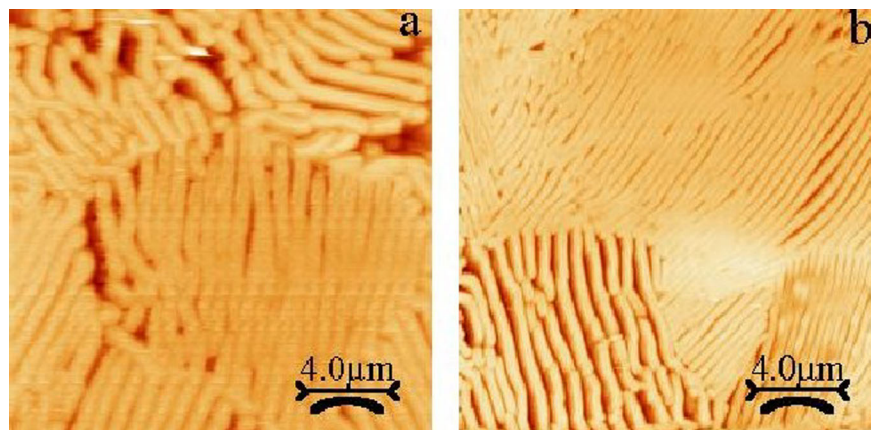


Figura 1 - Colônias de perlita nos aços stelmorizados: a) 1080; b) 1080CR Ataque: Nital 2% Aumento: 3750x Imagem de MFA.

Estas amostras foram rotuladas e acondicionadas em frascos contendo óleo de silicone e armazenadas em um freezer a cerca de -20°C.

Os tratamentos de envelhecimento foram realizados em temperaturas de 100, 110, 120, 140, 150, 160, 180 e 200°C e por tempos de 7, 15, 30, 75, 180 e 360min. As amostras foram desempenadas e tratadas em um banho de óleo de silicone equipado com controlador de temperatura e bomba de agitação mecânica. Após os tratamentos, as amostras foram resfriadas em água com gelo e armazenadas novamente a -20°C.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina INSTRON modelo 5582. A deformação foi medida com um extensômetro longitudinal de 50mm de base de medida até uma deformação igual a 1%.

3. Resultados e discussão

Os valores determinados para o espaçamento interlamelar médio da perlita nos aços 1080 e 1080CR (Figura 1) foram de 192±3nm e 157±4nm, respectivamente. Essa diferença de aproximadamente 20% menor no aço 1080CR em relação ao aço 1080 é atribuída ao cromo que eleva a temperatura de transformação eutetóide e promove o refinamento da estrutura.

Os valores das propriedades mecânicas dos fios máquina trefilados, determinados por ensaio de tração, são apresentadas na Tabela 2, cujos valores correspondem à média de pelo menos três ensaios, com erro médio relativo inferior a 5%.

Os efeitos do envelhecimento após deformação nas propriedades mecânicas dos aços foram avaliados a partir da variação do aumento percentual no limite de escoamento, P, com o tempo e a temperatura de envelhecimento. O parâmetro P foi definido como:

$$P = \frac{\sigma_{n(t)} - \sigma_{n(0)}}{\sigma_{n(0)}} \times 100 \quad (1)$$

onde $\sigma_{n(t)}$ é o limite de escoamento a 0,1% de deformação dos materiais trefilados e envelhecidos em um tempo t e em uma temperatura T e $\sigma_{n(0)}$ é o limite de escoamento a um percentual n de deformação dos materiais trefilados e não envelhecidos. A fração envelhecida, y, foi determinada como:

$$y = \frac{P}{P(\infty)} \quad (2)$$

em que P tem o significado anteriormente mencionado e P(∞) é o aumento percentual máximo no limite de escoamento, decorrente do envelhecimento.

A Figura 2 mostra as curvas de variação de P com o tempo de envelhecimento, obtidas para os aços 1080 e 1080CR. Essa figura mostra que, para os intervalos de temperatura estudados, os aços stelmorizados apresentaram dois estágios de envelhecimento. O primeiro estágio, que ocorreu em temperaturas

mais baixas, apresentou uma pequena variação em P com o tempo de envelhecimento. Em temperaturas mais elevadas, no segundo estágio de envelhecimento, o aumento nesse parâmetro foi mais intenso. Esses resultados são similares ao comportamento dos aços patenteados estudados por Yamada (1976), Dias (1988), Rodrigues (1989), Araújo (1992), Kemp et al. (1990) e Buono (1995).

As condições de transição entre o primeiro e o segundo estágios de envelhecimento foram distintas para os dois aços stelmorizados. Essa transição, no aço 1080, não foi bem definida, podendo ter ocorrido a 120°C após 21.600s (360 minutos), ou logo no início do tratamento a 140°C, com o valor máximo de P no primeiro estágio variando entre 23 e 30%. A mudança na inclinação da curva a 120°C indica que a transição no aço 1080CR ocorreu nessa temperatura, após um tempo de envelhecimento de 4500s (75 minutos), com um aumento percentual

Tabela 2 - Valores das propriedades mecânicas dos fios máquina trefilados.

Amostra	σ_R (MPa)	$\sigma_{e 0,2}$ (MPa)	$\sigma_{e 0,1}$ (MPa)	$\sigma_{e 0,05}$ (MPa)	A (%)	Z (%)
1080	1892 ± 19	1586 ± 59	1332 ± 32	1118 ± 33	2,9 ± 0,6	62 ± 3
1080CR	1981 ± 33	1720 ± 31	1351 ± 24	1138 ± 21	2,9 ± 0,4	58 ± 5

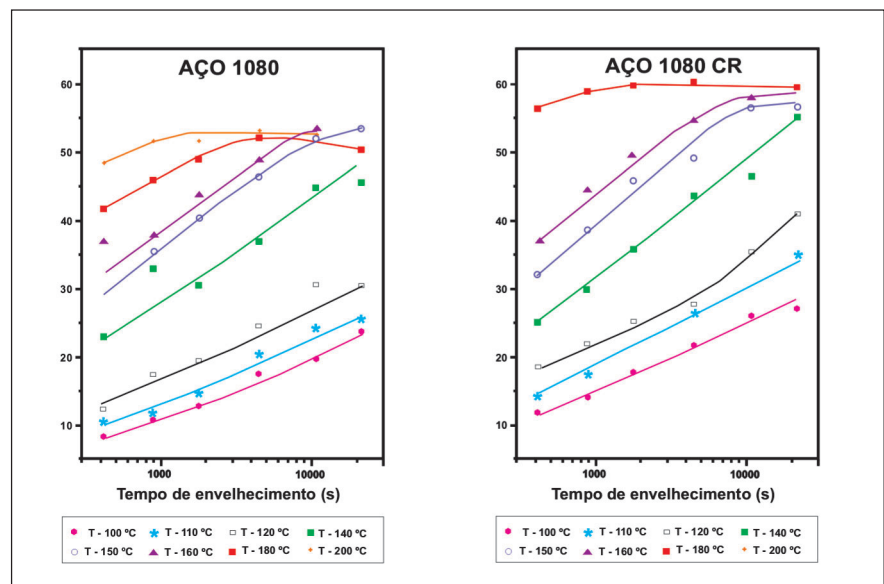


Figura 2 - Variação em P, aumento percentual em 0,1, nos aços 1080 e 1080CR.

tual no limite de escoamento de 28%. O valor de saturação de *P* no segundo estágio de envelhecimento do aço 1080 foi cerca de 53% a temperatura de 200°C e a saturação de *P* do aço 1080CR ocorreu a temperatura de 180°C, menor do que a observada para o aço 1080, porém, com um valor mais elevado de *P* máximo da ordem de 60%.

Para a determinação dos parâmetros cinéticos foi feito um ajuste da fração envelhecida, *y*, com o tempo de envelhecimento, *t*, segundo a equação de Harper, expressa pela equação:

$$y = 1 - \exp[-(kt)^n] \quad (3)$$

onde *k* é um parâmetro de velocidade, segundo a equação:

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (4)$$

sendo *k*₀ uma constante, *Q*, a energia de ativação do processo, *R*, a constante universal dos gases e *T*, a temperatura absoluta.

Os valores encontrados para o expoente do tempo, *n*, referente a cada temperatura, são mostrados na Tabela 3.

A análise dos valores da Tabela 3 mostra que, para o aço 1080, *n* é próximo de 1/3 entre 100 e 120°C e com tendência a 0,5 entre 140 e 180°C, confirmando os dois estágios de envelhecimento previstos nas curvas de *P* para esse aço. Os valores de *n*, para o aço 1080CR, indicam também a presença de dois estágios de envelhecimento, ocorrendo ambos valores próximos de *n* de 1/3 e de 1/2, respectivamente, a 120°C, indicando que a transição entre o primeiro e o segundo estágios de envelhecimento nesse material ocorreu nessa temperatura.

As Figuras 3 e 4 mostram os gráficos de ln*k* versus o inverso da temperatura absoluta (1/*T*) para os aços 1080 e 1080CR, respectivamente. A inclinação dessas curvas permitiu calcular as energias de ativação que são apresentados na Tabela 4, juntamente com seus respectivos coeficientes de correlação, *R*.

Tabela 3 - Expoentes do tempo, *n*, calculados a partir da variação do limite de escoamento com o envelhecimento, e coeficientes de correlação correspondentes, *R*.

T (°C)	1080		1080CR	
	n	R	n	R
100	0,31	0,995	0,29	0,998
110	0,31	0,984	0,3	0,999
120	0,29	0,983	0,26	0,999
			0,4	0,999
140	0,37	0,993	0,39	0,998
150	0,47	0,997	0,4	0,999
160	0,44	0,999	0,37	0,995
180	0,37	0,998	0,4	0,999

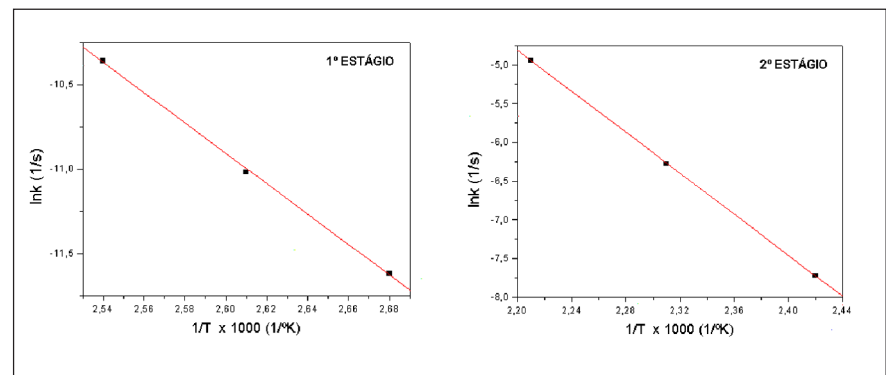


Figura 3 - Gráficos de ln*k* versus o inverso da temperatura absoluta (1/*T*) para o aço 1080.

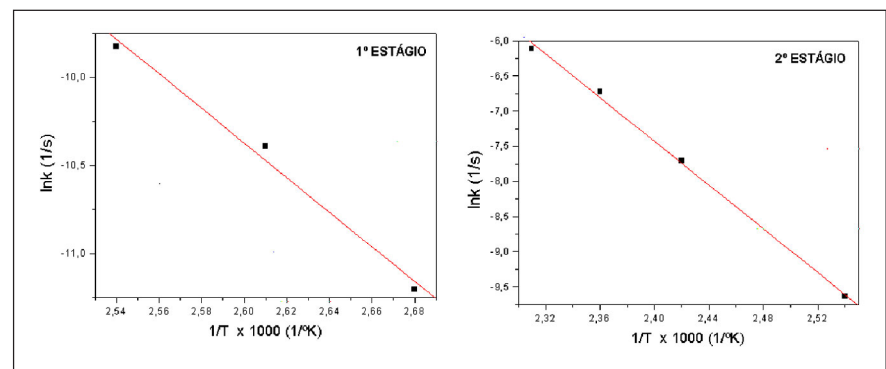


Figura 4 - Gráficos de ln*k* versus o inverso da temperatura absoluta (1/*T*) para o aço 1080CR.

Tabela 4 - Energias de ativação, *Q*, calculadas pela variação do limite de escoamento e seus respectivos coeficientes de correlação *R*.

Aço	Primeiro Estágio		Segundo Estágio	
	Q (kJ/mol)	R	Q (kJ/mol)	R
1080	76,6	0,999	108,1	1,000
1080CR	84,1	0,996	127,5	0,998

4. Conclusões

Esse trabalho permitiu concluir que:

- Os aços stelmorizados apresentaram dois estágios de envelhecimento. O primeiro estágio foi caracterizado por um pequeno aumento no limite de escoamento e o segundo, por uma variação mais acentuada.
- O mecanismo responsável pelo primeiro estágio foi o ancoramento de deslocamentos por átomos de nitrogênio e carbono em solução sólida na ferrita, na interface ferrita/cementita. Os valores da energia de ativação para a difusão do nitrogênio e do carbono na ferrita são próximos dos valores encontrados de 76,6 e 84,1 kJ/mol, para os aços 1080 e 1080CR, respectivamente.
- O segundo estágio foi associado à decomposição da cementita, que fornece átomos de carbono para o ancoramento das deslocamentos distribuídas em células nas interfaces ferrita/cementita. Os valores da energia de ativação de 108,1 e 127,5 kJ/mol obtidos para esse estágio são próximos do valor da energia de ativação correspondente à decomposição da cementita.
- O cromo promoveu o refinamento da estrutura através da diminuição no espaçamento interlamelar da perlita nos aços, o que intensificou os efei-

tos do envelhecimento nas propriedades mecânicas e reduziu a temperatura de transição do primeiro para o segundo estágio e a temperatura de saturação do fenômeno.

- Não foram encontradas diferenças significativas nos valores das energias de ativação entre os aços no segundo estágio de envelhecimento, significando que, pelo menos para o teor investigado, 0,25%, o cromo não desestabiliza a cementita.

5. Agradecimentos

À CAPES pelo suporte financeiro.

6. Referências bibliográficas

- ARAÚJO, F. G. S., GONZALEZ, B. M., CETLIN, P. R., COELHO, A. R. Z., MANSUR, R. A. *Wire Journal International*, n. 25, p. 57-61, 1992.
- BUONO, V.T.L. *Estudo da cinética de envelhecimento após deformação em aços perlíticos treilados através de propriedades físicas e mecânicas*, Belo Horizonte: CPGEM-UFGM, 1995. 251p. (Tese de Doutorado).
- BUONO, V. T. L., GONZALEZ, B. M., LIMA, T. M., ANDRADE, M. S. *Journal of Materials Science*, n. 32, p. 1005-1008, 1997.
- BUONO, V. T. L., ANDRADE, M. S., GONZALEZ, B. M. *Metallurgical and Materials Transactions*, 29A, p. 1415-1423, 1998.
- DEL RUE, H., HUMBEECK, J. V., AERNOUDT, E., LEFEVER, I., RAEMDONCK, W. V. *Wire Journal International*, n. 30, p. 74-80, 1997.
- DIAS, J. F. *Estudo do envelhecimento após deformação em fios de aço alto carbono treilados*, Belo Horizonte: CPGEM-UFGM, 1988. 131p. (Dissertação de Mestrado).
- GONZALEZ, B. M., BUONO, V. T. L., ANDRADE, M. S. *Metalurgia e Materiais*, n. 9, p. 462-464, 1999.
- GRIDNEV V. N., GAVRILJUK, V. G., NADUTOV, V. M. E POLUSHKIN Y. A. *Phis. Metals*, v. 50, n. 3, p.110-116, 1980.
- HINCHLIFFE, C. E., SMITH, G. D. W. *Materials Science and Technology*, n. 17, p. 148-154, 2001.
- KEMP, I. P., POLLARD, G., BRAMLEY, A. N. *Materials Science and Technology*, n.6, p. 331-336, 1990.
- LANGUILLAUME, J., KAPELSKI, G. E BAUDELET, B. *Materials Letters*. n. 33, p. 241-245, 1997.
- RODRIGUES, P. C. M. *Efeito da seqüência de tratamentos no envelhecimento após deformação de um aço perlítico treilado*, Belo Horizonte: CPGEM-UFGM, 1989. 178p. (Dissertação de Mestrado).
- SU, Y. Y., SHEMENSKI, R. M. *Wire Journal International*, n. 33, p. 128-139, 2000.
- VAN RANEMDONCK, W., LEFEVER, I., DAHENE, U. *Wire Journal International*, n. 27, p. 68-75, 1994.
- WATTÉ, P., HUMBEECK, J. V., AERNOUDT, E. E LEFEVER I. *Scripta Materialia*, n.34, p. 89-94, 1996.
- YAMADA, Y. *Trans. Iron Steel Inst. Japan*, n. 16, p. 417-426, 1976.

Artigo recebido em 26/07/2003 e
aprovado em 17/12/2003.

**Assinar e publicar na REM
é uma decisão inteligente.**

REM

68 anos divulgando CIÊNCIA
