



UNICAMP

A. A. COUTO; J. C. C. DE PAOLA & P. I. FERREIRA
DEPARTAMENTO DO CICLO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR
IPEN-CNEN/SP



cbecimat

Amostras de ligas Fe-24%at.Al com adições de até 6%at.Cr, na condição laminada a quente, foram submetidas a ciclos de tratamentos térmicos que visavam a obtenção das estruturas ordenadas B2 e DO₃. Corpos de prova nas diversas condições foram submetidos a ensaios de tração a temperatura ambiente. As amostras tiveram sua microestrutura analisada por difratometria de raios-x e microscopia eletrônica de transmissão. O melhor compromisso de resistência mecânica e ductilidade foi obtido na liga Fe-24%at.Al-2%at.Cr com estrutura $\alpha + B2$.

INTRODUÇÃO

Bradley e Jay [1], em 1932, mostraram a existência de dois tipos de estruturas ordenadas, B2(cs) e DO₃(cfc), em ligas binárias Fe-Al. O diagrama de fases Fe-Al, em composições próximas ao Fe₃Al, apresenta uma região onde está presente uma fase com estrutura desordenada α , uma com estrutura ordenada imperfeitamente B2, uma com estrutura DO₃ e regiões onde as fases ($\alpha + B2$) e ($\alpha + DO_3$) coexistem, como mostrado na figura 1. Segundo Allen e Cahn [2-5], as duas versões apresentadas na figura 1, propostas por Oki [6] e Okamoto [7], indicam as regiões de equilíbrio metaestável (linha pontilhada) e verdadeiro (linha contínua) do diagrama de fases próximo da composição Fe₃Al.

As ligas intermetálicas ordenadas baseadas no Fe₃Al possuem boa resistência mecânica até 600°C e uma excelente resistência à corrosão e à oxidação. Entretanto, estas ligas possuem uma limitada ductilidade à temperatura ambiente e evidenciam uma queda de resistência mecânica acima de 600°C. Na última década, muitos progressos têm sido alcançados no desenvolvimento de ligas baseadas no intermetálico Fe₃Al com ductilidade suficiente para seu emprego em aplicações estruturais. Em estudos feitos no Oak Ridge National Laboratory (EUA) [8-10], em ligas baseadas no Fe-28%at.Al com adições de cromo, foram obtidos alongamentos da ordem de 10% e limite de escoamento de 400MPa em ensaios de tração à temperatura ambiente no material totalmente ordenado DO₃.

Apesar do significativo avanço tecnológico na melhoria da ductilidade de ligas Fe₃Al, nos últimos anos, poucos estudos têm procurado correlacionar a microestrutura presente na liga com suas propriedades mecânicas. Em decorrência deste fato, o presente trabalho pretende dar uma contribuição neste sentido. Para isto, foram investigadas as propriedades mecânicas em tração à temperatura ambiente de ligas Fe-24%at.Al com adições de até 6%at.Cr, tratadas termicamente de modo a obter-se uma fração da fase B2 e da fase DO₃, visando compreender melhor como a presença destas fases afeta as propriedades mecânicas.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Ligas Fe-24Al e Fe-24Al-2 a 6Cr(%at.)

foram preparadas por fusão em forno resistivo sob atmosfera de argônio, usando ferro, alumínio e cromo comercialmente puros. As análises químicas feitas por técnicas distintas indicaram um teor de alumínio de $23,5 \pm 1,0\%$ at. Os lingotes obtidos, de seção quadrada de 15mm e 200g, foram laminados a quente na faixa de temperaturas de 1000 a 800°C até uma espessura de aproximadamente 0,8mm. Os corpos de prova para ensaios de tração, com seção reduzida de $(6 \times 0,8) \text{mm}^2$ e comprimento útil de 31mm, foram usinados com disco de rebôlo abrasivo. As ligas foram tratadas termicamente em duas diferentes condições: (1) 800°C/1h ao ar e resfriamento em água; e (2) 800°C/1h + 500°C/9d ao ar e resfriamento em água.

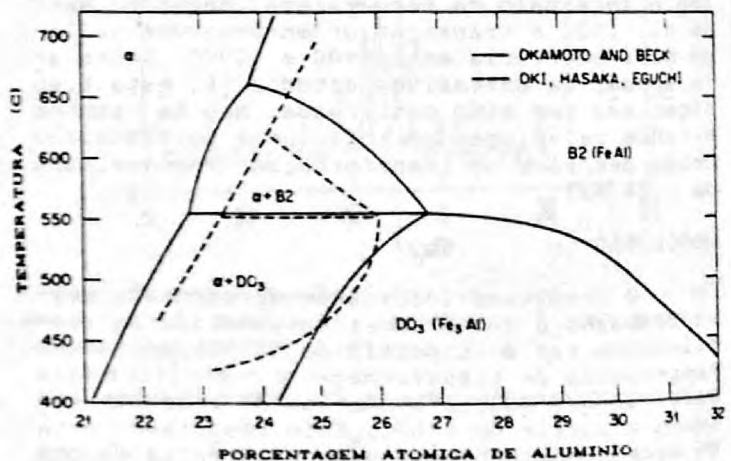


FIGURA 1: Diagrama de fases Fe-Al mostrando as fases de interesse próximas da composição estequiométrica Fe₃Al.

A análise das fases presentes no material nas várias condições de tratamento termomecânico foi feita a partir de difratogramas de raios-x, obtidos com a radiação CrK α . As amostras para observação por microscopia eletrônica de transmissão foram preparadas por meio do lixamento de discos de 3mm de diâmetro e eletroafinamento em eletrólito constituído de ácido perclórico e metanol. Os ensaios de tração foram feitos numa máquina universal de ensaios mecânicos, ao ar e à temperatura ambiente, usando uma taxa de deformação de 10^{-4}s^{-1} . Pelo menos dois corpos de prova foram testados em cada condição.

Tabela I- Efeito dos tratamentos mecano-térmicos no alongamento (A) e no limite de escoamento (σ_y) de ligas Fe-24Al e Fe-24Al-(2-6)Cr (at.) ensaiadas à temperatura ambiente e ao ar.

Condição	Fe-24Al		Fe-24Al-2Cr		Fe-24Al-4Cr		Fe-24Al-6Cr	
	A	σ_y	A	σ_y	A	σ_y	A	σ_y
	(%)	[MPa]	(%)	[MPa]	(%)	[MPa]	(%)	[MPa]
LQ	2,4	832	2,4	840	1,6	853	1,1	945
(1)	6,2	646	7,8	641	3,3	525	5,2	550
(2)	3,8	386	4,6	368	2,2	302	0,8	304

LQ- Laminado a quente / 1000-800 C

(1)-LQ + 800 C/1h

(2)-LQ + 800 C/1h + 500 C/9d

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela I são apresentados os resultados obtidos em ensaios de tração realizados à temperatura ambiente para as ligas Fe-24Al, Fe-24Al-2Cr, Fe-24Al-4Cr e Fe-24Al-6Cr (at.) nas três condições investigadas. Verifica-se que os maiores valores do limite de escoamento (σ_y) ocorrem no material na condição como laminado, para as quatro composições estudadas. O limite de escoamento, quando comparado com o material como laminado, é reduzido após os tratamentos térmicos. Esta redução é tanto maior quanto maior for o teor de cromo presente na liga. Os materiais na condição (2) apresentam limite de escoamento bem inferiores aos obtidos na condição (1). Os melhores resultados de ductilidade são verificados na condição (1), em especial para as composições Fe-24Al e Fe-24Al-2Cr.

Os resultados de difração de raios-x mostraram que o tratamento térmico na condição (1) induz no material uma estrutura α +B2, enquanto que o tratamento térmico na condição (2) conduz a uma estrutura α +D0₃. Porém, não foi possível determinar quantitativamente, por difração de raios-x, os teores das fases presentes devido à complicação associada ao efeito da textura no material.

A análise da microestrutura por microscopia eletrônica de transmissão de amostras das ligas Fe-24Al e Fe-24Al-2Cr não evidenciou mudanças que pudessem ser associadas ao teor de cromo. Estes materiais na condição como laminada têm a microestrutura caracterizada pela presença da fase α encruada contendo uma elevada densidade de discordâncias, como mostrado na figura 2. A imagem em campo escuro de uma região desta amostra, feita a partir da reflexão (100) de superreticulado, é apresentada na figura 3. Nota-se a presença de pequenos precipitados da fase B2, coerentes e livres de deformação, distribuídos uniformemente na matriz desordenada α . Estes finos precipitados não são detectáveis por difração de raios-x.

As amostras dos materiais na condição (1) têm uma microestrutura parcialmente recristalizada, constituída de áreas contendo grãos e subgrãos das fases α e B2 e regiões desordenadas contendo emaranhados de discordâncias, como ilustrado na figura 4. As regiões de fase B2 contém contornos de domínios ordenados que podem ser observados em campo escuro na figura 5, utilizando a reflexão (100). Nas amostras da condição (2),

nota-se que a microestrutura parcialmente recristalizada não é alterada, porém, caracteriza-se pela presença de uma elevada densidade de precipitados da fase ordenada D0₃ no interior da fase desordenada α , como pode ser verificado nas imagens em campo claro e campo escuro nas figuras 6 e 7.

A análise de fases presentes em cada condição permitiu verificar que a cinética de formação da fase B2 é extremamente rápida, sendo esta encontrada já na condição laminada a quente. Ao contrário do que ocorre com a estrutura B2, a estrutura D0₃ somente é obtida com tratamentos térmicos de longa duração. Os resultados mecânicos e de análise microestrutural indicam que as microestruturas contendo uma mistura de fases α e B2 conduzem ao melhor compromisso resistência mecânica-ductilidade. Este fato ainda não está totalmente compreendido, pois os materiais com estrutura B2 são habitualmente frágeis. Há uma possibilidade de que a estrutura B2 ("imperfeita") possa favorecer uma melhoria da ductilidade através da dissociação das superdiscordâncias, facilitando o escorregamento cruzado [11,12].

As ligas na condição (2) (800C/1h + 500C/9d) mostraram uma degradação da resistência mecânica devido à presença da fase D0₃. Houve uma melhoria da ductilidade nesta condição em relação aos materiais no estado como laminado, mas apresentando valores inferiores aos obtidos nos materiais tratados termicamente a 800C/1h, com estrutura α +B2. Esta melhoria na ductilidade, quando da presença da fase D0₃, também foi obtida por Mckamey e outros [8]. Entretanto, as ligas investigadas por Mckamey contém 28at.Al, favorecendo a formação de uma estrutura completamente D0₃. As investigações buscando correlacionar as propriedades mecânicas obtidas em ligas baseadas no Fe₃Al, em diferentes condições de tratamento termo-mecânico, com a microestrutura terá prosseguimento, visando um melhor entendimento destes materiais e sua possível utilização em aplicações estruturais em temperaturas elevadas.

CONCLUSÕES

1. O material como laminado apresenta uma microestrutura deformada, com elevada densidade de discordâncias e precipitados da fase B2 coerentes e livres de deformação. Nesta condição, o material mostra valores elevados de resistência mecânica e baixa ductilidade.

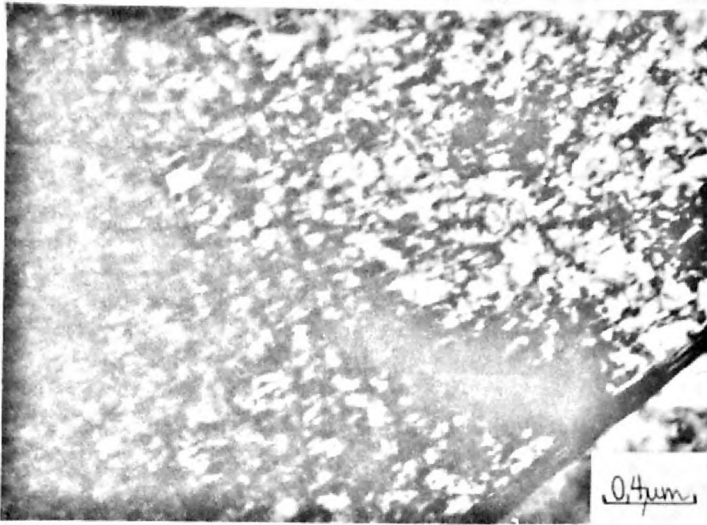


FIGURA 2: Micrografia típica da liga Fe-24%at.Al laminada a quente, mostrando a fase α (desordenada) encruada, contendo elevada densidade de discordâncias.

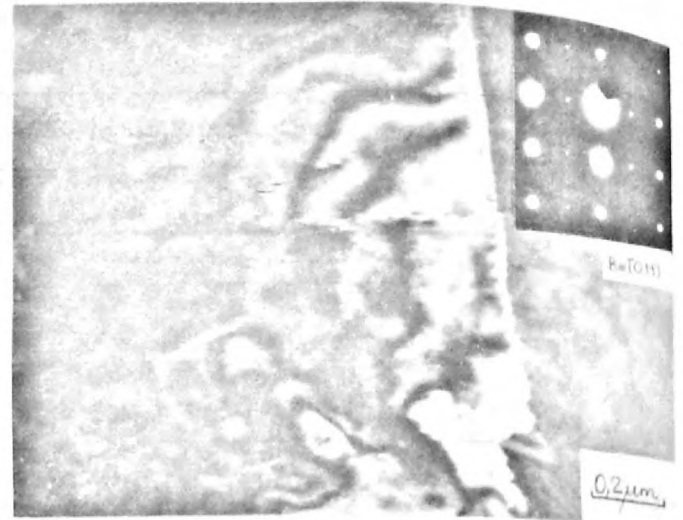


FIGURA 5: Detalhe, em campo escuro utilizando a reflexão (100), de uma região da amostra da figura 4, contendo contornos de domínios ordenados B2.

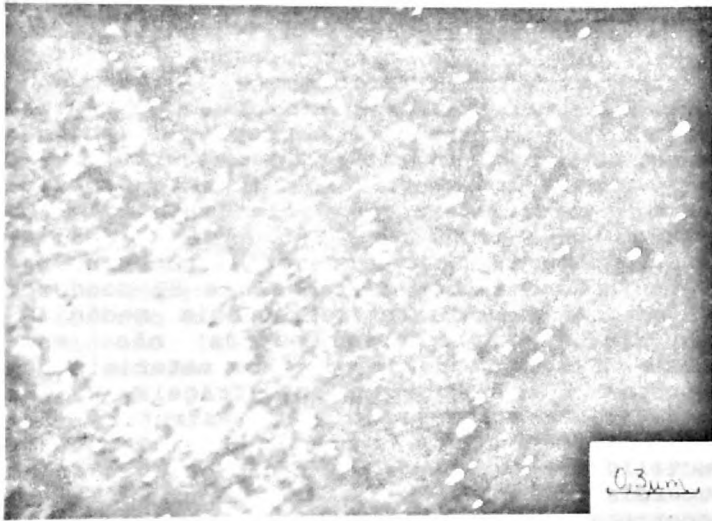


FIGURA 3: Micrografia em campo escuro, a partir da reflexão (100), da liga Fe-24%at.Al laminada a quente, evidenciando precipitados da fase B2 na matriz desordenada α .

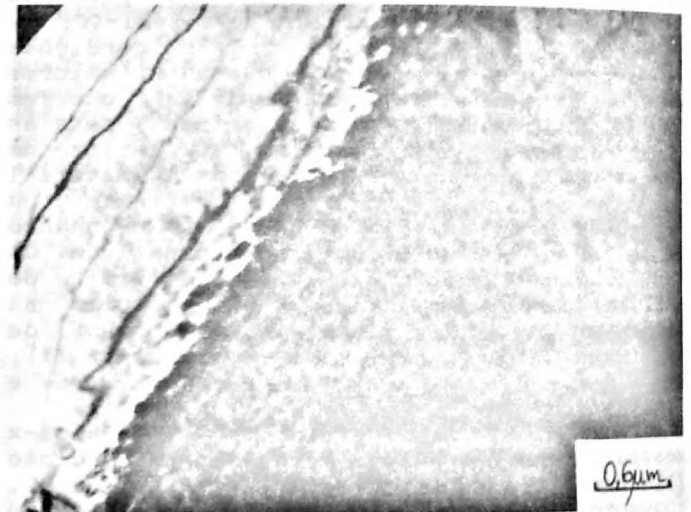


FIGURA 6: Micrografia típica da liga Fe-24%at.Al-2%at.Cr laminada a quente e tratada termicamente por 800C/1h + 500C/9d.

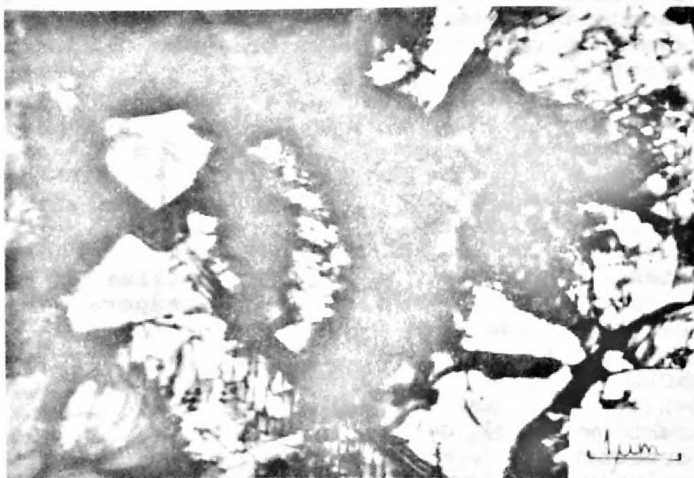


FIGURA 4: Micrografia típica da liga Fe-24%at.Al-2%at.Cr laminada a quente e tratada termicamente a 800C/1h, mostrando uma microestrutura parcialmente recristalizada.

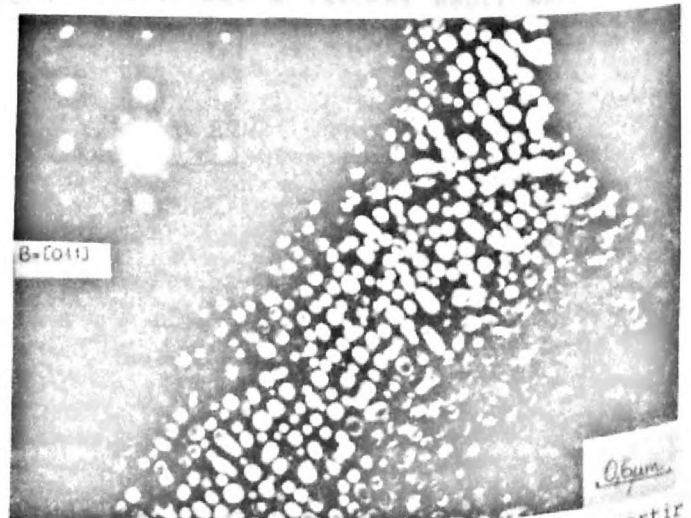


FIGURA 7: Micrografia em campo escuro a partir da reflexão (111), da região da figura 6, evidenciando os precipitados da fase B2 na matriz desordenada α .

2. As ligas tratadas termicamente a 800C/1h apresentam uma microestrutura parcialmente recristalizada com estrutura mista α +B2. Esta é a condição que mostra a melhor ductilidade e o decréscimo acentuado na resistência mecânica.
3. O material com presença de precipitados ordenados D0₃ na matriz desordenada α apresenta uma melhoria da ductilidade em relação ao material como laminado, mas com um decréscimo acentuado na resistência mecânica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos técnicos Wildemar A. M. Ferreira e Glauson A. F. Machado pela colaboração na análise microestrutural e serviços fotográficos.

REFERÊNCIAS

- [1] BRADLEY, A.J. & JAY, A.H.; Proc. R. Soc. (London), Ser.A, 136(1932)p.210.
- [2] ALLEN, S.M. & CAHN, J.W.; Acta Metall., 23(1975)p. 1017.
- [3] ALLEN, S.M. & CAHN, J.W.; Scr. Metall., 10(1969)p.451.
- [4] ALLEN, S.M. & CAHN, J.W.; Acta Metall., 24(1976)p.425.
- [5] ALLEN, S.M.; Philos. Mag., 36(1977)p.81.
- [6] OKI, K.; HASAKA, M. & EGUCHI, T.; Jpn. Appl. Phys., 12(1973) p.1522.
- [7] OKAMOTO, H. & BECK, P.A.; Metall. Trans., 2(1971)p.569.
- [8] MCKAMEY, C.G.; LIU, C.T.; CATHCART, J.V.; DAVID, S.A. & LEE, E.H.; ORNL/TM-10125 (Oak Ridge National Laboratory, TN, 1986).
- [9] MCKAMEY, C.G.; LIU, C.T.; DAVID, S.A.; HORTON, J.A. PIERCE, D.H. & CAMPBELL, J.J.; Development of Iron Aluminides for Coal Conversion Systems, ORNL/TM 10793 (Oak Ridge National Laboratory, TN, 1988).
- [10] SIKKA, V.K.; MCKAMEY, C.G.; HOWELL, C.R. & BALDWIN, R.H.; Fabrication and Mechanical Properties of FeAl-Based Aluminides, ORNL/TM-11465 (Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, 1990).
- [11] WRIGHT, R. N.; in Proceedings of the Fourth Annual Conference on Fossil Energy Materials, ORNL/FMP-90/1 (U. S. Department of Energy, Oak Ridge, TN, August 1990), p.231.
- [12] HUBBARD, C.; Oak Ridge National Laboratory, "Phase Equilibria of Fe-28Al Alloys by High Temperature XRD", presentation at Denver X-ray Conference, August 1, 1990.

SUMMARY

Fe-24at.%Al alloys containing 0-6at.%Cr were fabricated by hot rolling. The as hot rolled material was submitted to heat treatments for the obtention of B2 and D0₃ structure. Tensile tests were performed at room temperature on the as rolled and heat treated materials. The microstructure of the as hot rolled and heat treated samples was characterized using x-ray diffraction and transmission electron microscopy. The best results of ductility and mechanical strength were obtained for the Fe-24at.%Al-2at.%Cr with a microstructure containing desordered (α) and ordered B2 structures.