

**TEXTURA CRISTALOGRÁFICA E PROPRIEDADES
MECÂNICAS DA LIGA Fe-24Al-2Cr (%at.)
ORDENADA B2 E D0₃“ (01)**

ANTONIO AUGUSTO COUTO (02)
LIANA GUIMARÃES MITTEREGGER (03)
NELSON BATISTA DE LIMA (04)
PAULO IRIS FERREIRA (05)

RESUMO

Amostras da liga Fe-24Al-2Cr(%at.) laminadas a quente, foram submetidas a tratamentos térmicos que visavam a obtenção das estruturas ordenadas B2 (800°C/1h) e D0₃ (800°C/1h + 500°C/9d). Corpos de prova nas diversas condições foram ensaiados em tração a temperatura ambiente. As amostras tiveram sua microestrutura observada por microscopia eletrônica de transmissão. As análises da textura cristalográfica foram feitas por meio da função distribuição de orientação (FDO). O material na condição laminado a quente e tratado termicamente a 800°C/1h apresentou componentes de textura típicas de deformação e de recristalização. A mudança na ordenação do tipo B2 para D0₃ não altera as componentes de textura do material. A condição de melhor combinação de alongamento e limite de escoamento foi obtida na liga tratada termicamente a 800°C/1h (α + B2). A deteriorização das propriedades mecânicas devido ao tratamento térmico a 500°C/9d não foi ocasionada por efeito de textura, mas pela mudança na estrutura cristalina de α + B2 para α + D0₃.

Palavras-Chave: Textura, Intermetálicos, Ordenação.

(01) - Contribuição técnica a ser apresentada no 50º Congresso Anual da ABM, São Pedro, SP, 01/08/95 a 04/08/95.

(02) - Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Mestre em Tecnologia Nuclear, Pesquisador do IPEN-CNEN/SP, São Paulo, SP.

(03) - Membro da ABM, Doutoranda em Tecnologia Nuclear do IPEN-CNEN/SP, São Paulo, SP.

(04) - Doutor em Tecnologia Nuclear, Pesquisador do IPEN-CNEN/SP, São Paulo, SP.

(05) - Membro da ABM, PhD, Pesquisador do IPEN-CNEN/SP, São Paulo, SP.

INTRODUÇÃO

Aluminetos de ferro baseados no Fe_3Al são ligas intermetálicas ordenadas com excelente resistência à oxidação, boa resistência à sulfetação, elevada resistência mecânica e menor custo de material quando comparadas com muitas ligas convencionias, tornando-as candidatas a aplicações estruturais em ambientes corrosivos em altas temperaturas [1,2]. Contudo, a baixa ductilidade a temperatura ambiente e a queda na resistência mecânica acima de 600°C impõem severas restrições à utilização destes aluminetos. Estas limitações tem motivado muitas das recentes investigações em ligas baseadas no Fe_3Al .

McKamey e outros [3-6] tem investigado os efeitos da composição das ligas Fe_3Al no limite de escoamento e no alongamento medido em ensaios de tração a temperatura ambiente. Estes autores observaram um aumento na ductilidade da liga de 1 a 5%, com um decréscimo no limite de escoamento de 800 a 350 MPa quando o teor de alumínio é aumentado de 24 a 30%at.. Foi verificado também que a ductilidade da liga Fe-28Al(%at.) pode ser significativamente melhorada pela adição de até 6%at. de cromo, com leve decréscimo no limite de escoamento.

O diagrama de fases Fe-Al, em composições próximas ao Fe_3Al , apresenta uma região onde está presente uma fase com estrutura desordenada α (cúbica de corpo centrado), uma com estrutura ordenada imperfeitamente do tipo B2 (cúbica simples), uma estrutura ordenada do tipo D0_3 (cúbica de faces centradas) e regiões onde as fases ($\alpha + \text{B2}$) e ($\alpha + \text{D0}_3$) coexistem, como mostrado na figura 1 [7,8]. Alguns dos presentes autores, em trabalhos anteriores [9,10], em ligas Fe-24%at.Al com adições de até 6%at. de cromo, mostraram que o melhor compromisso de resistência mecânica e ductilidade foi obtido na liga Fe-24Al-2Cr(%at.) com estrutura cristalina $\alpha + \text{B2}$. Os melhores resultados de ductilidade em todas as ligas estudadas (Fe-24%at.Al com zero, 2, 4 e 6%at.Cr) ocorreram quando a estrutura $\alpha + \text{B2}$ estava presente. Na condição em que a estrutura presente foi a $\alpha + \text{D0}_3$, tanto a ductilidade como o limite de resistência apresentaram uma queda acentuada nos seus valores, para todas as composições investigadas.

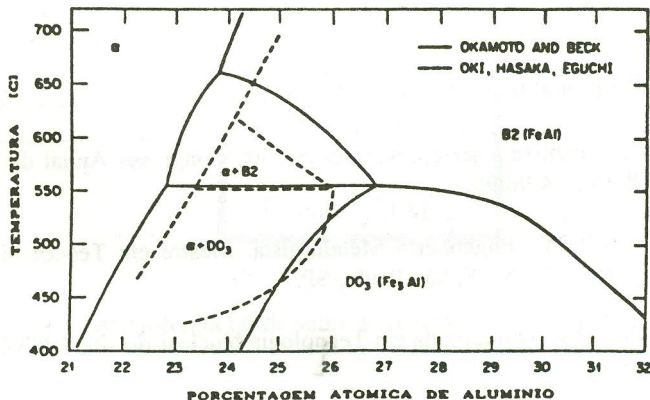


Figura 1 - Diagrama de fases Fe-Al, mostrando as fases de interesse próximas da composição estequiométrica Fe_3Al .

Apesar do significativo avanço tecnológico na melhoria da ductilidade de ligas Fe₃Al, poucos estudos tem procurado correlacionar a microestrutura presente na liga com suas propriedades mecânicas. Em decorrência deste fato, os presentes autores tem contribuído, nos últimos anos, para um melhor entendimento desta correlação, principalmente no que diz respeito ao efeito das fases ordenadas B2 e D0₃ nas propriedades mecânicas destas ligas. Nesta investigação serão analisadas as medidas de textura cristalográfica por meio da função distribuição de orientação entre as fases ordenadas (B2 e D0₃) e desordenada (α) da liga Fe-24Al-2Cr(%at.). Os resultados de textura cristalográfica obtidos serão comparados com as propriedades mecânicas da liga.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A liga Fe-24Al-2Cr(%at.) foi preparada por fusão em forno resistivo sob atmosfera de argônio. Os lingotes obtidos ($m = 200g$) foram laminados a quente na faixa de temperatura de 1000 a 800°C até uma espessura de aproximadamente 0,8 mm. Após a laminação, a liga foi tratada termicamente em duas diferentes condições:

- (1) 800°C/1h ao ar e resfriado em água;
- (2) 800°C/1h + 500°C/9dias ao ar e resfriado em água.

A avaliação da textura das amostras foi efetuada por meio da análise das funções distribuição de orientações (FDO), onde obtém-se, quantitativamente, a fração volumétrica de células unitárias com a mesma orientação cristalográfica em função dos ângulos de Euler ($\varphi_1, \phi, \varphi_2$) [11]. A partir da FDO é possível calcular o índice J de textura, definido por $J = 2\pi \int (f(g))^2 dg$, onde $f(g)$ é a função distribuição de orientação. Para J igual a 1, a amostra não apresenta textura e para J tendendo a infinito, a amostra aproxima-se de um monocristal. Na obtenção das FDOs foram processadas quatro figuras de polo incompletas dos planos (110), (200), (211) e (310). As figuras de polo foram obtidas utilizando-se a radiação k_α do cobalto e um goniômetro automático de textura [12], a passos constantes ($\Delta\alpha$ e $\Delta\beta$) de 5° e ângulo máximo (α_{max}) de 70°. As amostras para observação no microscópio eletrônico de transmissão, JEOL-200C, foram preparadas por meio de lixamento de discos de 3 mm 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 a temperatura ambiente, usando uma taxa de deformação de $10^{-4} s^{-1}$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas figuras 2 e 3 são apresentadas as secções das funções distribuição de orientações (FDOs), para as fibras TD ($\varphi_1 = 90^\circ$ e $\varphi_2 = 45^\circ$) e RD ($\varphi_1 = 0^\circ$ e $\varphi_2 = 45^\circ$) respectivamente, em função do ângulo ϕ , das amostras da liga Fe-24Al-2Cr(%at.) laminada a quente, tratada termicamente a 800°C/1h e a 800°C/1h + 500°C/9d. As componentes de textura (001)<110> e (112)<110>, indicadas nas figuras 2 e 3, evidenciam textura de deformação. Além disto, a presença da componente (110)<001> mostra também a existência de textura de recristalização.

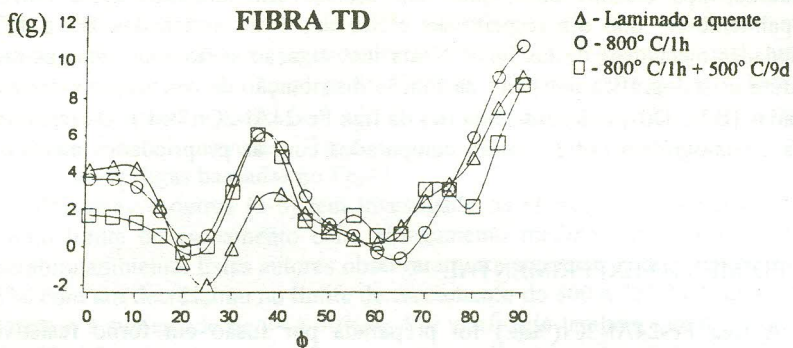


Figura 2 - Função distribuição de orientações - Fibra TD (secção $\varphi_1 = 90^\circ$, $\varphi_2 = 45^\circ$).

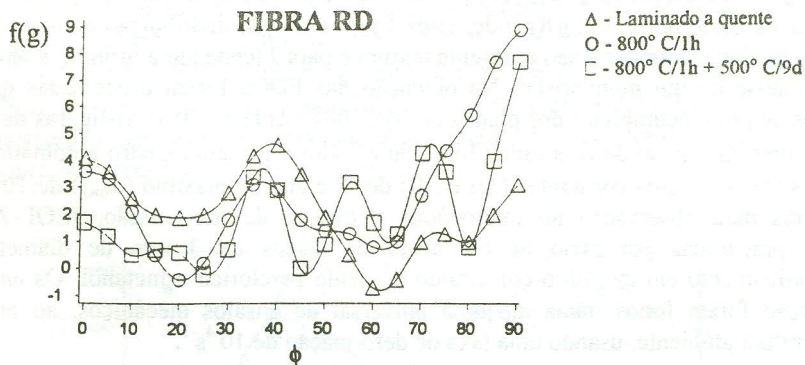


Figura 3 - Função distribuição de orientações - Fibra RD (secção $\varphi_1 = 0^\circ$, $\varphi_2 = 45^\circ$).

Na figura 4 é mostrada uma micrografia típica da amostra na condição laminada a quente, com estrutura desordenada α [10], onde pode-se notar a presença de uma região ainda deformada, adjacente a uma área menor apresentando recristalização. A observação desta micrografia está coerente com a análise de textura feita nesta amostra.

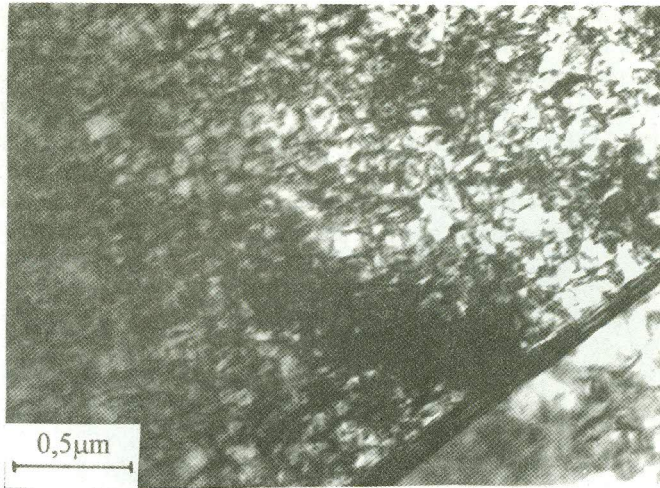


Figura 4 - Micrografia obtida por MET da amostra na condição laminada a quente.

A amostra tratada termicamente a 800°C por 1 hora, com estrutura cristalina $\alpha + B2$ [10], apresentou uma microestrutura parcialmente recrystalizada, como mostrado na figura 5. A componente típica de textura de recrystalização (110)<001> permanece presente. Além disto, a amostra nesta condição apresenta outras componentes de textura: (110)<110> e (112)<111>. Isto sugere que regiões ainda deformadas pela laminação a quente, quando recrystalizadas, não induzem uma textura típica de recrystalização, mas, provavelmente, ocasionada pela ação conjunta da recrystalização e da ordenação do tipo B2.



Figura 5 - Micrografia obtida por MET da amostra tratada termicamente a 800°C/1h.

As amostras com estrutura $\alpha + B2$ ($800^{\circ}\text{C}/1\text{h}$) e $\alpha + D0_3$ ($800^{\circ}\text{C}/1\text{h} + 500^{\circ}\text{C}/9\text{d}$) apresentaram as mesmas componentes de textura, como pode ser visto nas FDOs em secções constantes de φ_1 , apresentadas nas figuras 6 e 7. A microestrutura típica da amostra tratada termicamente a $800^{\circ}\text{C}/1\text{h} + 500^{\circ}\text{C}/9\text{d}$ não mostrou mudança significativa sob o ponto de vista da recristalização da amostra, ou seja, o tratamento térmico a $500^{\circ}\text{C}/9\text{d}$ foi insuficiente para provocar evolução na recristalização. Contudo, na micrografia desta amostra, apresentada na figura 8, são observadas em campo escuro, a partir da reflexão de superreticulado (111), regiões ordenadas $D0_3$ em contraste numa matriz desordenada α .



Figura 6 - Função distribuição de orientações em secções constantes de φ_1 para a amostra tratada termicamente a $800^{\circ}\text{C}/1\text{h}$.



Figura 7 - Função distribuição de orientações em secções constantes de φ_1 para a amostra tratada termicamente a $800^{\circ}\text{C}/1\text{h} + 500^{\circ}\text{C}/9$ dias.

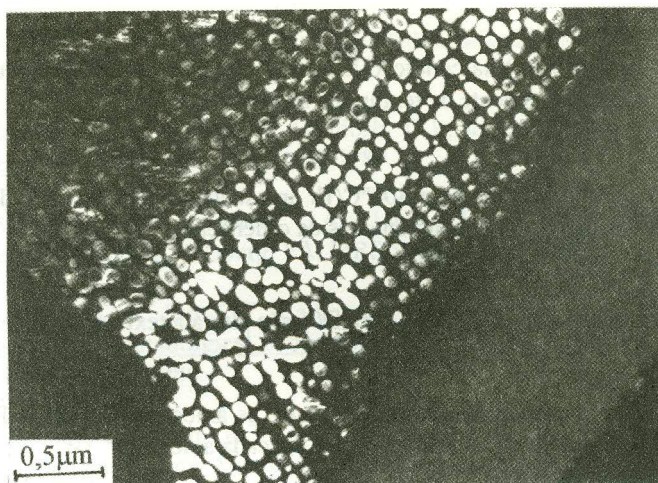


Figura 8 - Micrografia obtida por MET da amostra tratada termicamente a 800°C/1h + 500°C/9 dias.

Na tabela I [10] são mostrados os resultados de limite de escoamento e alongamento, obtido em ensaios de tração a temperatura ambiente, das amostras nas condições estudadas. Nota-se uma grande diferença entre as propriedades mecânicas em tração entre as amostras com estrutura $\alpha + B2$ (800°C/1h) e $\alpha + D0_3$ (800°C/1h+500°C/9d). Como foi mostrado anteriormente que praticamente não existe diferença entre a textura e o grau de recristalização destas duas amostras, as diferenças nas propriedades mecânicas são ocasionadas basicamente pelo tipo de ordenação presente em cada amostra. Com relação às diferenças nas propriedades mecânicas entre as amostras na condição laminada a quente e ordenada, não foi possível identificar separadamente a contribuição da microestrutura de recristalização e da textura, pois ambas acontecem concomitantemente.

Tabela I - Efeito dos tratamentos mecano-térmicos no limite de escoamento (σ_y) e no alongamento (A) da liga Fe-24Al-2Cr (% at.) ensaiadas em tração a temperatura ambiente.

Condição	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)
LQ	840	2,4
(1)	641	7,8
(2)	368	4,6

LQ - Laminado a quente

(1) - LQ + 800°C/1h

(2) - LQ + 800°C/1h + 500°C/9d

CONCLUSÕES

- (1) A liga Fe-24Al-2Cr(%at.) na condição laminada a quente apresenta textura típica de deformação e uma componente de textura de recristalização.
- (2) A amostra tratada termicamente a 800°C/1h apresenta as componentes de textura típicas da recristalização e outras componentes da ordenação.
- (3) A mudança da ordenação do tipo B2 para D0₃ não altera a textura do material.
- (4) As diferenças nas propriedades mecânicas entre as amostras ordenadas B2 e D0₃ são ocasionadas pelo tipo de ordenação presente em cada amostra.

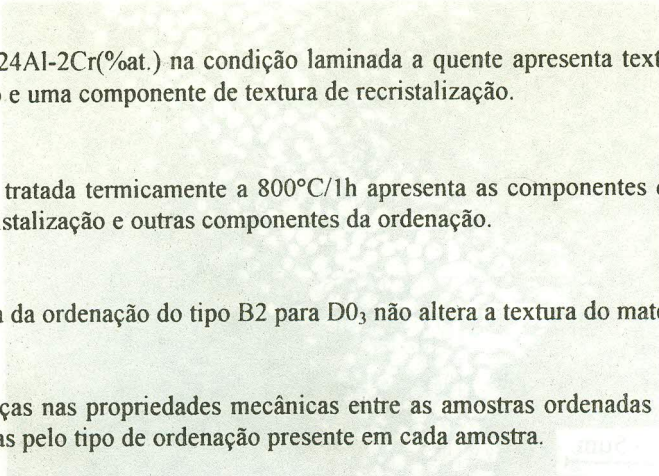


Figura 8 - Micrografia obtida por MET da amostra tratada termicamente a 800°C/1h + 500°C/2 dias.

Na tabela I são mostrados os resultados de análise de escaneamento e alinhamento, sendo em cada caso de traços e temperaturas ambiente, das amostras nas condições estudadas. Nota-se uma grande diferença entre as propriedades mecânicas em traço entre as amostras com estruturas $\alpha + \beta_2$ (800°C/1h) e $\alpha + D0_3$ (500°C/2 dias). Como foi mostrado anteriormente, que praticamente não existe diferença entre a textura e o grau de recristalização destas duas amostras, as diferenças nas propriedades mecânicas são ocasionadas basicamente pelo tipo de ordenação presente em cada amostra. Com relação às diferenças nas propriedades mecânicas entre as amostras em condição laminada a quente e aquelas não foi possível identificar, praticamente a contribuição da microestrutura de recristalização e da textura, pois ambas ocorrem concomitantemente.

Tabela I - Efeito dos tratamentos térmicos no limite de escoamento (σ_s) e no alinhamento (λ) da liga Fe-24Al-2Cr (%at.) estudada em traço a temperatura ambiente.

Condição	Limite de escoamento (σ_s) (MPa)	Alinhamento (λ) (%)
D0 ₃	810	2,4
(1)	611	7,8
(2)	708	4,0

10 - amostra a quente
11 - 800°C/1h
12 - 500°C/2 dias

REFERÊNCIAS

- [1] De Van, D.H.; in Oxidation of High-Temperature Intermetallics. Warrendale, PA, TMS, 1989.
- [2] Smialek, J.L.; Doychak, J.; Gaydos, D.J.; in Oxidation of High-Temperature Intermetallics. Warrendale, PA, TMS, 1989.
- [3] McKamey, C.G.; Horton, J.A.; Liu, C.T.; in High-Temperature Ordered Intermetallic Alloys II. Pittsburg, PA, MRS Symp. Proc., 1987.
- [4] McKamey, C.G.; Liu, C.T.; Cathcart, J.V.; David, S.A.; Lee, E.H.; Evaluation of Mechanical and Metallurgical Properties of Fe₃Al - Based Alloy, Oak Ridge, TN, ORNL / TM-10125, 1986.
- [5] 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, Oak Ridge, TN, ORNL / TM-10793, 1988.
- [6] Sikka, V.K.; McKamey, C.G.; Howell, C.R.; Baldwin, R.H.; Fabrication and Mechanical Properties of Fe₃Al-Based Iron Aluminides, Oak Ridge, TN, ORNL / TM-11465, 1990.
- [7] Oki, K.; Hasaka, M.; Eguchi, T.; Jpn. Appl. Phys., v. 12, p. 1522, 1973.
- [8] Okamoto, H.; Beck, P.A.; Metall. Trans., v. 2, p. 569, 1971.
- [9] Couto, A.A.; De Paola, J.C.; Ferreira, P.I.; Anais do 10º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Águas de Lindóia, SP, p. 452, 1992.
- [10] Ferreira, P.I.; Couto, A.A.; De Paola, J.C.; Proceedings of 3rd International Conference on High Temperature Intermetallics, San Diego, CA, Maio 1994. A ser publicado no "Journal of Materials Science and Engineering".
- [11] Lima, N.B.; Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 1992.
- [12] Lima, N.B.; Pontes, E.W.; Monteiro, P.R.B.; Imakuma, K.; Anais do 6º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, p. 290, Rio de Janeiro, 1984.

“EFFECT OF CRYSTALLOGRAPHIC TEXTURE ON MECHANICAL PROPERTIES OF THE B2 AND D0₃ TYPE ORDERING Fe-24Al-2Cr (at.%) ALLOY”

ABSTRACT

Hot rolled Fe-24Al-2Cr(at.%) alloy specimens were submitted to two heat treatments to obtain the B2 (800°C/1h) and D0₃ (800°C/1h + 500°C/9d) ordered structures. Room temperature tensile tests were carried out in all heat treatment conditions. The microstructure was observed by Transmission Electron Microscopy. The crystallographic texture was analysed by means of the orientation distribution function (ODF). The material in the hot rolled condition, as well as, that heat treated at 800°C/1h presented typical components of deformation and recrystallization texture. The change from the B2 to D0₃ type ordering did not alter the texture components of the material. The best combination of elongation and yield strength was obtained for the alloy heat treated at 800°C/1h ($\alpha + B2$). The deterioration of the mechanical properties due to the heat treatment at 500°C/9d is not associated with texture effects, but by the change from the B2 to D0₃ crystalline structure.

Key-Words: Texture, Intermetallics, Ordering.
