

ESTRUTURA E PROPRIEDADES DAS LIGAS DE Ti-(40-4X)%Nb-X%Mo COM ENE TERMICAMENTE TRATADAS

Silva M.A.¹, Matlakhova L.A.², Matlakhov A.N.³, Júnior E.R.P.⁴, Goncharenko B.A.⁵.

¹UENF/Laboratório de Materiais Avançados, marcia.asilva@hotmail.com

²UENF/Laboratório de Materiais Avançados, lioudmila@uenf.br

³UENF/Laboratório de Materiais Avançados, anatoli@uenf.br

⁴UENF/Laboratório de Materiais Avançados, herval@uenf.br

⁵ IMET/ Russian Academy of Science, palii@ultra.imet.ac.ru

Resumo - Tendo em vista que os efeitos não elásticos (ENE) estão correlacionados com transformações martensíticas reversíveis, neste trabalho foram analisadas a estrutura e propriedades das ligas Ti-(40-4x)%Nb-x%Mo termicamente tratadas, onde os teores de nióbio e molibdênio variam entre 24 e 40%Nb e 0 e 4%Mo (% em peso). A análise estrutural e de fase das ligas foi feita através da microscopia ótica e difração de raios X. As propriedades avaliadas neste estudo foram resistividade elétrica e densidade. A liga Ti-40%Nb revelou uma estrutura composta da fase β , martensita α' e com pequena participação de α' e ω . As ligas com teores de Mo de 1 a 4%, possuem estruturas semelhantes, compostas pela fase β e com traços da fase α' . Assim, revela-se maior capacidade do Mo como β estabilizador. O aumento do teor de Mo na composição das ligas causa um aumento da resistividade elétrica destas. As amostras analisadas podem ter sofrido variação de volume causada por transformações de fase, o que, possivelmente, causou diferença entre os valores de densidade calculada (teórica) e experimental.

Palavras-chave: Ligas de Ti-Nb-Mo, Análise estrutural, Resistividade elétrica.

Área do Conhecimento: Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Introdução

As ligas de titânio, contendo β -estabilizadores, como nióbio e molibdênio, apresentam alta resistência à corrosão, boas propriedades mecânicas e baixo peso. Além disso, estas ligas podem também revelar efeitos não elásticos (ENE), como o efeito de memória de forma (EMF), superelasticidade (SE), alto atrito interno, entre outros.

Como estas ligas ainda estão em fase de pesquisa e desenvolvimento, a importância deste trabalho consiste em aprimorar o conhecimento, visando possível aplicação das ligas em várias áreas, incluindo o setor offshore, indústria química, eletrônica, medicina e equipamentos especiais.

Sabendo que os ENE estão correlacionados com transformações martensíticas reversíveis, o objetivo deste trabalho é o estudo da estrutura e propriedades, tais como resistividade elétrica e densidade, das ligas Ti-(40-4x)%Nb-x%Mo termicamente tratadas, onde os teores de nióbio e molibdênio variam, respectivamente, entre 24 e 40%Nb e 0 e 4%Mo (% em peso).

Metodologia

As ligas do sistema Ti-(40-4x)%Nb-x%Mo utilizadas neste trabalho foram fabricadas pela técnica de cinco fusões em forno elétrico a arco, no Instituto de Metalurgia e de Materiais (IMET) em Moscou, na Rússia. Na etapa final

de fabricação, as ligas foram temperadas e laminadas a frio, com grau de deformação de cerca de 20-30%.

Foram cortadas amostras de cada liga e estas foram preparadas metalograficamente para análise, seguindo as etapas metalográficas convencionais, descritas no trabalho de Taylor e Weidmann.

A análise estrutural das ligas foi realizada utilizando os microscópios Olympus BX41M e Neophot 32. As observações foram feitas utilizando aumentos entre 50x e 500x em dois regimes de observação: luz polarizada e interferência diferencial. As micrografias foram captadas por câmeras digitais acopladas aos microscópios (Sony Cyber-Shot DSC W35/W55 e KODO color câmera CCD, respectivamente).

A identificação das fases presentes nas ligas foi feita através da difração de raios X, utilizando o difratômetro SHIMADZU modelo XRD-7000, com passo de varredura ($\Delta\theta$) de 0,03 s e tempo de 3 s, usando radiação de $\text{Cu-K}\alpha$. A condição de difração de raios X é dada pela equação de Bragg.

A identificação das fases presentes nas ligas analisadas foi realizada através da comparação entre os valores das distâncias interplanares obtidas, referente aos planos cristalográficos das fases α' , α'' , ω e β , encontrados na literatura.

As medidas da resistividade elétrica das ligas foram realizadas através do método das quatro pontas, onde duas destas pontas são usadas para transportar a corrente (i) e as outras duas para monitorar a tensão (V). Para tal, foi utilizada uma fonte de tensão Tectronix PS2520G, um multímetro Agilent 34420A e uma ponteira de quatro pontas Cascade.

Com o objetivo de investigar a influência da composição na densidade das ligas, as amostras foram submetidas ao ensaio de densidade através do método de Arquimedes adaptado.

Resultados

Os difratogramas das ligas analisadas são apresentados na Figura 1.

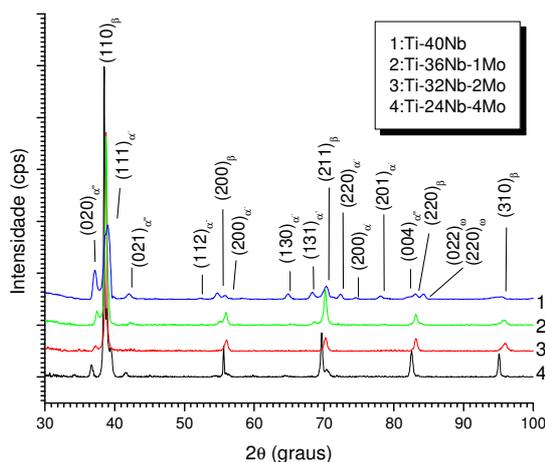


Figura 1: Difratogramas das ligas analisadas

Como foi determinado pela análise de difração de raios X, a estrutura da liga Ti-40%Nb temperada, sem adição de molibdênio, possui uma estrutura complexa, composta de fase de alta temperatura β , da martensita α'' e ainda com uma pequena participação das fases α' e ω , como pode ser observado no difratograma 1 da Figura 1. Com teores de molibdênio variados (de 1 a 4%), a estrutura é semelhante, composta da fase β e com traços da fase martensítica α'' , como é visto nos difratogramas de 2 a 4 na Figura 1.

O aspecto morfológico das ligas de composição Ti-40%Nb e Ti-24%Nb-4%Mo é apresentado na Figura 2 (a) e (b), respectivamente.

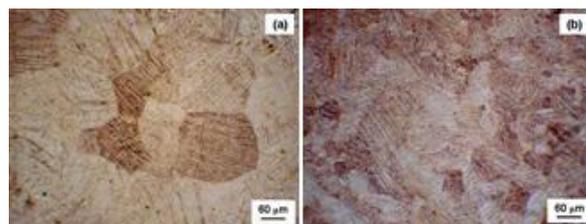


Figura 2: Microestrutura das ligas (a) Ti-40%Nb e (b) Ti-24%Nb-4%Mo, com aumento de 100x.

Tabela 1: Resultados de medidas de resistividade elétrica e densidade nas ligas analisadas.

Composição da liga	Fases	$\rho \times 10^{-6}$ (Ωm)	γ_{Arq} (g/cm^3)	$\gamma_{\text{teórica}}$ (g/cm^3)
Ti-40%Nb	$\beta, \alpha'', \alpha', \omega$	3,55	5,420	5,564
Ti-36%Nb-1%Mo	$\beta + \alpha''$	3,18	5,385	5,474
Ti-32%Nb-2%Mo	$\beta + \alpha''$	3,87	5,469	5,387
Ti-32%Nb-2%Mo	$\beta + \alpha''$	4,40	5,422	5,387
Ti-24%Nb-4%Mo	$\beta + \alpha''$	7,20	5,821	5,220

Através da análise dos resultados de resistividade elétrica obtidos, apresentados na Tabela 1, nota-se que, para as ligas contendo de 1 a 4% de Mo, esta propriedade tem seu valor aumentado com o aumento do teor de molibdênio presente na liga. Na liga Ti-36%Nb-1%Mo, o valor de resistividade encontrado foi $3,18 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$, aumentando para $7,20 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ na liga Ti-24%Nb-4%Mo. Notou-se um aumento na resistividade elétrica da liga Ti-40%Nb, cujo valor numérico foi igual a $3,55 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$.

A análise dos resultados de densidade obtidos experimentalmente pelo método de Arquimedes (γ_{Arq}) revelou boa concordância entre estes e os valores teóricos esperados ($\gamma_{\text{teórica}}$) nas ligas Ti-40%Nb e Ti-36%Nb-1%Mo, e uma distinção entre os mesmos nas ligas com elevado teor de molibdênio (2 e 4%Mo), como é visto na Tabela 1.

Discussão

A liga Ti-40%Nb apresentou uma estrutura complexa, composta pelas fases β , α'' , α' e ω . Isso indica que essa quantidade de nióbio como β estabilizador não estabiliza

completamente a fase β a temperatura de análise.

A substituição do nióbio por molibdênio em proporção de 4:1, adicionando 1%, 2% e 4% de Mo, faz com que a estrutura das ligas temperadas sofra mudanças significativas. A estrutura destas ligas é semelhante, composta pelas fases β , como principal e traços da fase α'' . Assim, revela-se maior capacidade do molibdênio como β estabilizador.

Fedotov, com colaboradores, determinou que a liga Ti-40%Nb, no estado temperado, possui a estrutura composta principalmente de fase β . Neste trabalho, a estrutura da liga, da mesma composição foi determinada como bastante complexa, constituída de fases β e martensita α'' , com traços ainda de fases α' e ω . Isso pode ser explicado, lembrando que estas ligas temperadas em seguida foram deformadas. A deformação da fase β metaestável pode provocar a transformação martensítica, induzida por deformação, formando as fases martensíticas. A presença da fase β nas ligas investigadas com molibdênio revela este elemento como muito importante para estabilizar a fase β de alta temperatura.

De acordo com Collings, a presença da fase ω nas ligas de Ti é responsável por um aumento nos valores de resistividade elétrica das mesmas. No presente estudo, através da análise das fases presentes no espectro de raios X da liga Ti-40%Nb, notou-se a presença da fase ω , que foi associada ao aumento no valor da resistividade elétrica da mesma liga.

Através da comparação entre os valores de resistividade elétrica obtidos para as ligas contendo de 1% a 4% de Mo em peso, pode-se observar que este aumenta em função do aumento do teor de molibdênio na suas composições. A resistividade elétrica dos elementos que constituem as ligas, de acordo com Smith, são $0,427 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ (Ti), $0,144 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ (Nb) e $0,0535 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ (Mo). Comparando os resultados de resistividade

elétrica das ligas analisadas, com a grandeza ρ dos elementos constituintes, nota-se um aumento significativo de ρ nas ligas. Isso pode ser explicado pelo fato que os elementos de liga dissolvidos no metal base, sempre aumentam a resistividade elétrica nas ligas. Além disso, o valor de ρ do titânio puro foi medido nas condições de Ti- α , enquanto que as ligas analisadas possuem outra modificação alotrópica, β .

Os resultados de medida da densidade apresentaram distinção considerável da densidade teórica. Isso poderia ser explicado pela possível variação na composição real, durante a preparação das ligas e/ou pelas transformações de fase, que, possivelmente, causaram diferença entre os valores das densidades. Entretanto, esta divergência ainda deve ser analisada com maiores detalhes.

Conclusão

Elevados teores de Nb e Mo nas ligas de Ti investigadas, levam a estabilização da fase β . Nas ligas com teor de Mo entre 1-4%, a substituição de Nb por Mo, mantendo o “equivalente β -estabilizador” de 4:1, revelam a fase β como principal com traços da martensita α' . Para a liga Ti-40%Nb, o teor de Nb referido não é suficiente para estabilizar completamente a fase β , pois a deformação a frio, após a têmpera, induz a formação de fases martensíticas. Isso explica porque a estrutura apresenta as fases metaestáveis α'' , α' e ω , além da fase β .

O aumento do teor de Mo na composição das ligas causa um aumento da resistividade elétrica destas. A presença da fase ω , que foi notada na liga de composição Ti-40%Nb, implica em valores elevados de resistividade elétrica nas ligas de Ti.

As ligas analisadas podem ter sofrido variação de volume em consequência da transformação de fases, o que teria causado

diferença entre os valores de densidade esperados e os resultados obtidos.

Referências

- CALLISTER Jr, W.D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- COLLINGS, E.W. The Physical Metallurgy of Titanium Alloys. OH: ASM International Metals Park, 1984. 261p.
- FEDOTOV, S.G.; KONSTANTINOV, K.M.; KOKNAEV, R.G.; SINODOVA, E.P. Estrutura, Propriedades e Decomposição da Martensita nas Ligas de Titânio - Nióbio. Ligas de Titânio com Propriedades Especiais. Moscou: Nauka, 1982. p. 29-32.
- FEDOTOV, S.G.; KONSTANTINOV, K.M.; SINODOVA, E.P. Propriedades, Estruturas e Transformações nas Ligas Temperadas de Titânio - Nióbio com Estruturas ($\alpha'+\omega+\beta$), ($\omega+\beta$) e β . Ligas de Titânio com Propriedades Especiais. Moscou: Nauka. p. 78-82, 1982.
- GIROTTO, E.M.; SANTOS, I.A. Medidas de Resistividade Elétrica DC em Sólidos: Como Efetuá-las Corretamente. *Quim. Nova*, Vol. 25, No.4, p. 639-647, 2002.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R. Fundamentos de Física. Vol. 2. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1994.
- LEYENS, C.; PETERS, M. Titanium and Titanium Alloys. Germany: Wiley-VCH GmbH & Co. KGaA, 2003. p. 513.
- REED-HILL, R. E.; ABBASCHIAN, R. Physical metallurgy principles. 3 ed. Boston: PWS, 1992.
- SMITH, W.F. Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais. 3 Edição. Portugal: Editora McGraw-Hill de Portugal, 1998.
- TAHARA, M.; KIM, H.Y.; HOSODA, H., MIYAZAKI, S. Cyclic deformation behavior of a Ti-26 at.% Nb alloy. Acta Materialia Inc. Elsevier, 2009.
- TAYLOR, B.; WEIDMANN, E. Metallographic preparation of titanium. Disponível em <http://www.struers.com/resources/elements/12/104827/Application_Note_Titanium_English.pdf>. Acesso em: 10 set. 2008.