

CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DE UMA LIGA Cu-Al-Ni QUE EXIBE O EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA

Braga F.O.¹, Matlakhov A.N.², Matlakhova L.A.³

¹UENF/Laboratório de Materiais Avançados, fabio_obra@gmail.com.br

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

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

Resumo – As ligas metálicas do sistema Cu-Al-Ni, que exibem o Efeito de Memória de Forma (EMF), têm sido uma alternativa vantajosa sobre as ligas Ti-Ni, Cu-Zn e Cu-Zn-Al por apresentarem superiores características do EMF, melhor conformabilidade e baixo custo. No presente trabalho estudou-se uma liga policristalina de composição nominal Cu-13,8%Al-4,0%Ni (% em peso) fabricada por fusão à plasma seguida de moldagem por injeção. A caracterização da liga foi feita a partir das técnicas de microscopia óptica (MO), microscopia de força atômica (MFA) e difração de raios X, bem como através de medidas de microdureza Vickers, resistividade e densidade. Os resultados obtidos foram tratados estatisticamente para se obter os valores médios representativos. Mostrou-se que os grãos da liga apresentam tamanho médio de $200 \pm 60 \mu\text{m}$ e estrutura lamelar em seu interior. A composição química da liga apresenta a fase de alta temperatura β_1 e as fases martensíticas γ'_1 e β'_1 . A densidade da liga é $7,15 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$. A microdureza e resistividade da liga foram medidas como sendo $321 \pm 20 \text{ kgf/mm}^2$ e $(4,02 \pm 0,04) \times 10^{-7} \Omega\text{m}$.

Palavras-chave: Liga Cu-Al-Ni, estrutura, propriedades, efeito de memória de forma.

Área do Conhecimento: Metalurgia Física

Introdução

As características das ligas com EMF vêm motivando o desenvolvimento de aplicações em diversas áreas técnicas, desde a robótica até a aeroespacial. Estas ligas, após serem deformadas, possuem a habilidade de voltar a sua forma original, devido às transformações martensíticas reversíveis (TMR) ocorridas num estreito intervalo de temperatura (Otsuka e Wayman, 1999).

As TMR podem ser conduzidas por aplicação de uma tensão externa e/ou ação de temperatura. Com isso, a fase de alta temperatura β_1 transforma-se para a fase martensítica γ'_1 e/ou para a fase martensítica β'_1 , dependendo do teor de Al. É provável também a presença da fase R intermediária (Pereira, 2009a).

Para ocorrer o EMF em regime repetitivo, as ligas requerem múltiplos ciclos de aquecimento e resfriamento num intervalo de temperatura que inclui as temperaturas críticas de TMR. Estes tratamentos promovem alterações na estrutura e nas propriedades das ligas (Matlakhova et al., 2008).

O objetivo principal do presente trabalho é estudar a estrutura e algumas propriedades da liga policristalina Cu-13,8%Al-4,0%Ni no seu estado bruto (inicial) antes de aplicar os tratamentos termo-cíclicos.

Metodologia

A liga de composição Cu-13,8%Al-4,0%Ni foi produzida na Universidade Federal de Campina Grande através da técnica de fusão de plasma seguida de moldagem por injeção e

fornecida na forma de uma barra (Fig. 1) (Silva et al., 2007).

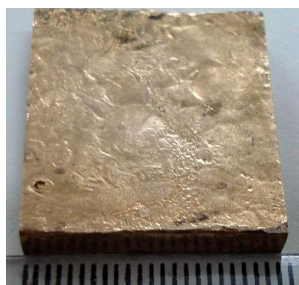


Figura 1 – Aspecto geral da liga.

A liga fornecida foi submetida ao lixamento, com lixas de 100mesh a 1200mesh, e polimento abrasivo, com pastas de diamante de 3 μ m e 1 μ m.

A densidade da liga foi estimada com base na sua composição química nominal (CQ) e medida através da pesagem hidrostática (PH).

As observações estruturais da liga foram executadas nos microscópios OLYMPUS BX-41M e NEOPHOT-32 em diferentes aumentos e iluminações, incluindo a luz polarizada.

A quantificação da estrutura foi feita a partir das micrografias, utilizando-se o programa de análise de imagens SCION.

Os ensaios de microdureza foram realizados com o auxílio de um microdurômetro MHP-100 acoplado ao microscópio NEOPHOT-32, aplicando-se uma carga de 30g.

A resistividade da liga foi medida a partir do método da sonda (Fig. 2), utilizando-se 4 eletrodos de W equidistantes (s=2mm).

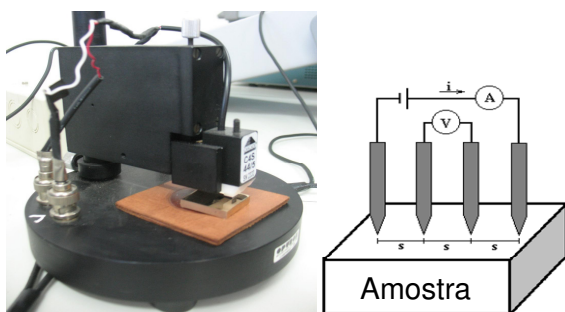


Figura 2 – Medida de resistividade.

A análise por difração de raios X foi realizada no difratômetro SHIMADZU XRD-7000, com radiação Cu-K α filtrada. A identificação das fases presentes na liga foi feita com base nos padrões espectrais do programa JCPDS.

O aspecto topográfico de uma amostra da liga cortada (5x5x3mm) e atacada pelo reagente de coloração (K₂S₂O₅ + Na₂S₂O₅ + H₂O) foi estudado utilizando-se o microscópio de força atômica NANOSCOPE-3D (Fig. 3).

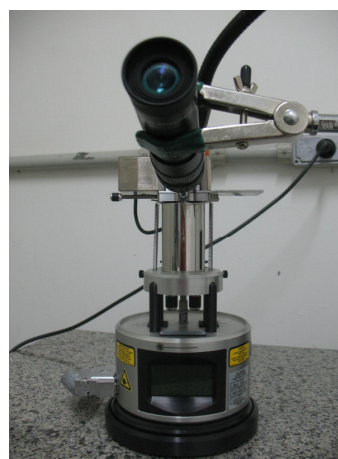


Figura 3 – Microscópio de força atômica.

Resultados

A Tabela 1 mostra os valores de densidade obtidos pela composição química nominal (CQ) e pela pesagem hidrostática (PH), seu desvio padrão (σ) e erro absoluto (ϵ).

Tabela 1 – Densidade (d, g/cm³) da liga.

Método	d	σ	ϵ
CQ	8,079	-	-
PH	7,151	0,017	0,033

A Figura 4 mostra o aspecto microscópico da liga em luz polarizada após o ataque pelo reagente (K₂S₂O₅+Na₂S₂O₅+H₂O) e sem ataque.



Luz polarizada; Com ataque; 30x



Luz polarizada; Sem ataque; 70x

Figura 4 – Estrutura da liga (MO).

A Figura 5 mostra, na forma de um histograma, a frequência dos diferentes tamanhos de grão da liga policristalina.

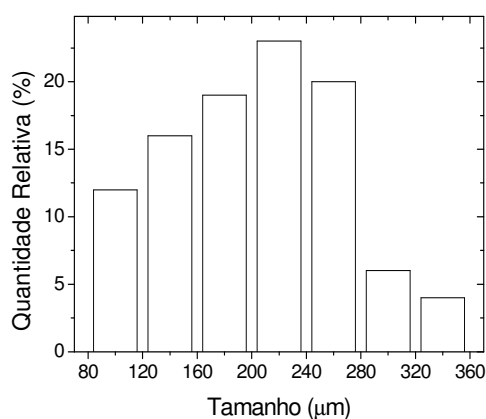


Figura 5 – Distribuição dos grãos por tamanhos.

Os valores médios de microdureza da liga medida em três regiões distintas e seus desvios

padrões (σ) e erros absolutos (ϵ) são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Microdureza (HV, kgf/mm²) da liga.

Região	HV	σ	ϵ
1	309,96	10,15	19,89
2	323,08	10,36	20,30
3	329,40	12,66	24,81

Os valores médios de resistividade da liga medida em três regiões distintas e seus desvios padrões (σ) e erros absolutos (ϵ) são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resistividade (ρ , $\Omega\text{m}\times 10^{-7}$) da liga.

Região	ρ_i	ρ	σ	ϵ
1	3,97			
2	4,04	4,02	0,04	0,04
3	4,04			

Na Figura 6 é apresentado o difratograma da liga cujos picos são identificados como pertencentes às fases β'_1 , γ'_1 , β_1 e R.

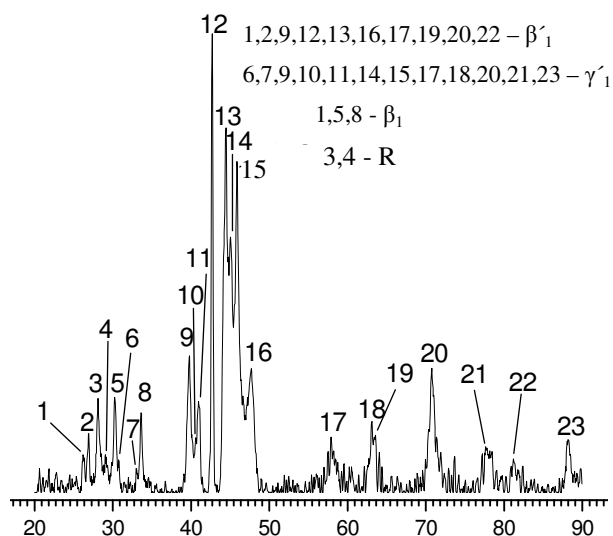


Figura 6 – Difratograma da liga.

A Figura 7 mostra os detalhes da microestrutura da liga atacada, visíveis ao microscópio da força atômica.

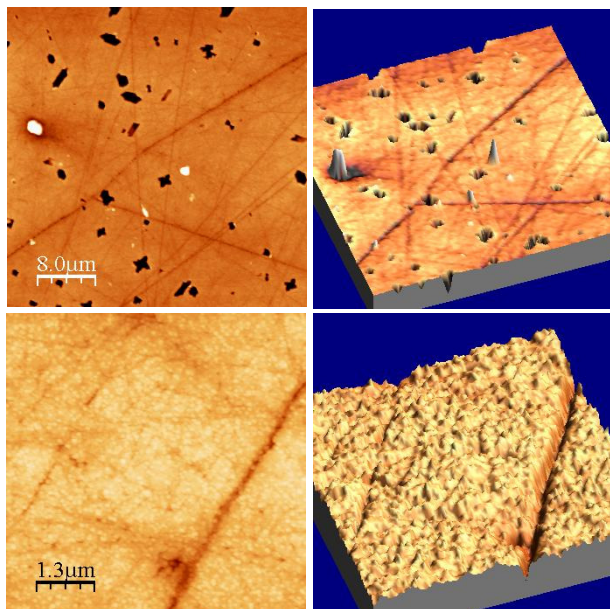


Figura 7 – Aspecto topográfico da liga em 2D e 3D (MFA).

Discussão

A densidade estimada com base na composição química nominal da liga representa o valor máximo ($8,079\text{g/cm}^3$) que esta liga pode apresentar (Tab. 1). O valor experimental de densidade da liga ($7,15\text{g/cm}^3$), medido através da pesagem hidrostática, é menor por razões ligadas com os defeitos estruturais da liga, sendo comparável com os valores encontrados na literatura (Cruz, 2008).

A liga examinada é composta por grossos grãos de tamanho médio de $200\mu\text{m}$ (Fig. 4), havendo a distribuição de tamanhos próxima à normal (Fig. 5). A estrutura no interior dos grãos possui o aspecto martensítico com finas e largas lamelas, paralelas e cruzadas em forma de V. Em geral, as características granulométricas e o aspecto microestrutural da liga examinada são semelhantes à liga

policristalina da composição Cu-13,7%Al-4,0%Ni que foi estudada por Silva, 2009.

Os valores de microdureza, medidos em três regiões distintas da liga (nas extremidades e na parte central), apresentam um pequeno desvio em relação à média 321kgf/mm^2 (Tab. 2). Este alto valor indica a presença na liga das fases intermetálicas, sendo maior que encontra-se na literatura (Silva, 2009).

Os valores de resistividade, medidos em três regiões distintas da liga (nas extremidades e na parte central), apresentam um pequeno desvio em relação à média $(4,02 \pm 0,04) \times 10^{-7} \Omega\text{m}$ (Tab. 3).

Pequenos desvios dos valores de microdureza e resistividade em relação à média são um indicativo de alta homogeneidade da liga em composição química, composição física e estrutura.

A composição física da liga (Fig. 6) apresenta as seguintes fases intermetálicas: a fase de alta temperatura β_1 ordenada do tipo BiF_3 ; a fase martensítica β'_1 ortorrômbica ordenada do tipo AlCu_3 ; a fase martensítica γ'_1 ortorrômbica ordenada do tipo Cu_3Ti e, provavelmente, a fase R ordenada ($\text{Al}_7\text{Cu}_4\text{Ni}$) do sistema romboédrico (Pereira et al., 2009b). Segundo a relação entre as intensidades dos picos de difração, verifica-se a presença das fases β'_1 e γ'_1 em maior fração volumétrica. Visto que as intensidades relativas dos picos das fases β_1 , β'_1 e R distinguem-se dos espectros padrões, supõe-se que os grãos destas fases sofreram uma textura, ou seja, apresentam uma determinada orientação dos planos cristalográficos.

A análise topográfica da liga após o ataque colorido (Fig. 7), que resulta em formação de uma fina película dos produtos sólidos, não revelou o relevo martensítico dos grãos, pois a película o mascara. Os contornos de grão são mais atacados e, nas imagens obtidas em 2D e 3D, aparecem escuras. Os pontos pretos podem ser interpretados como poros ou pites do ataque.

Conclusões

A densidade da liga é determinada como 7,15g/cm³, sendo inferior à densidade teoricamente estimada (8,079g/cm³).

A liga é composta por grãos de tamanho médio 200µm, apresentando a distribuição normal dos grãos por seus tamanhos.

A estrutura dos grãos é martensítica e formada por lamelas finas e largas, paralelas e cruzadas em forma de V.

As fases presentes na liga são β_1 de alta temperatura, β'_1 martensítica, γ'_1 martensítica e, provavelmente, R, com a predominância das fases β'_1 e γ'_1 .

A microdureza Vickers da liga é elevada (321kgf/mm²) e confirma a presença das fases intermetálicas.

A medida de resistividade, que não varia muito de uma região à outra ($4,02 \times 10^{-7} \Omega m$), indica sobre a homogeneidade da liga em sua composição química e física.

Referências

CRUZ, T.O.; MATLAKHOV, A.N. Efeito do Tratamento Térmico na Estrutura de Ligas Monocristalina e Policristalina de Cu-Al-Ni. Campos dos Goytacazes, 2008.

MATLAKHOVA, L.A.; PEREIRA, E.C.; MATLAKHOV, A.N.; MONTEIRO, S.N.; TOLEDO, R. Mechanical behavior and fracture characterization of a monocrystalline Cu-Al-Ni subjected to thermal cycling treatments under load. Materials Characterization. 2008. n 59, p 1630-1637.

OTSUKA, K; WAYMAN, C.M. Shape Memory Materials, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1999.

PEREIRA, E.C. Estudo da Estabilidade Estrutural e Propriedades de ligas à base de Cu-Al-Ni solicitados a Tratamentos Termocíclicos. Campos dos Goytacazes, 2009a.

PEREIRA, E.C.; MATLAKHOVA, L.A.; MATLAKHOV, A.N.; CASTILLÓ, T.E.; RODRÍGUEZ, R.J.S. Influência da Ciclagem Térmica na Estrutura e Características de Transformações Martensíticas Reversíveis da Liga Monocristalina Cu-13,7%Al-4,2%Ni; in: 64º Congresso Anual da ABM – 13-17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil. CDROM.

SILVA, M.M.; SILVA, N.J.; ARAÚJO, C.J. Influência do Reprocessamento por Plasma nas Propriedades de uma Liga Cu-Al-Ni com Memória de Forma. Revista Eletrônica de Materiais e Processos. v.22, 2007.

SILVA, S.E.T.P.; Análise Estrutural da Liga Policristalina Cu-13,7%Al-4%Ni submetida a Tratamento Termo-Cíclico sob Carga. Campos dos Goytacazes – RJ, 2009.