

HISTERESE TÉRMICA DE TRANSFORMAÇÕES MARTENSÍTICAS REVERSÍVEIS EM LIGAS MONOCRISTALINAS DE Cu-Al-Ni⁽¹⁾

Elaine Cristina Pereira⁽²⁾

Lioudmila Aleksandrovna Matlakhova⁽³⁾

Anatoliy Nikolaevich Matlakhov⁽⁴⁾

Rosane Toledo⁽⁵⁾

Ruben J. S. Rodríguez⁽⁶⁾

Fátima Rúbia de Matos Dias⁽⁷⁾

Resumo

Neste trabalho foi estudada uma liga monocristalina Cu-13,5%Al-4%Ni com o efeito de memória de forma, submetida a tratamentos termo-cíclicos (TTC), que inclui 100, 200 e 300 ciclos, de resfriamento e aquecimento, num intervalo que abrange as temperaturas críticas de transformações martensíticas reversíveis (TMR). Maior atenção foi dada ao estudo das alterações da sua estrutura e da histerese térmica de TMR. A liga foi fabricada pela empresa "Memory Crystals Group", na Rússia. A histerese térmica, bem como as temperaturas críticas de TMR, foram estudadas a partir da análise calorimétrica diferencial (DSC). Na caracterização estrutural da liga foram envolvidas a microscopia ótica e a análise por difração de raios-X. Os TTC foram realizados em regime livre de tensões aplicadas. Mostrou-se que a liga resfriada ou aquecida abaixo e acima das temperaturas críticas M_f e A_f apresenta na temperatura ambiente, a qual fica no intervalo das temperaturas críticas mencionadas, uma alteração em sua estrutura devido à histerese térmica. Os TTC realizados promovem mudanças na estrutura e ligeira ampliação e deslocamento dos intervalos críticos de TMR, porém, não alteram a histerese térmica.

Palavras-chaves: Liga monocristalina Cu-Al-Ni; Transformações martensíticas reversíveis; Histerese térmica.

(1) 60º Congresso Anual - Internacional da ABM - 25 a 28 de Julho de 2005, Belo Horizonte, MG, Brasil.

(2) Mestranda do LAMAV/CCT/UENF.

(3) Eng.^a Metalúrgica, M.Sc., Ph.D., Professora Associada, LAMAV/CCT/UENF.

(4) Eng.^o Metalúrgico, M.Sc., Ph.D., Professor Associado, LAMAV/CCT/UENF.

(5) Eng.^a Eletricista, M.Sc., D.Sc., Pesquisadora, LCFIS/CCT/UENF.

(6) Eng.^o Químico, M.Sc., Ph.D., Professor Associado, LAMAV/CCT/UENF.

(7) Eng.^a Metalúrgica, LAMAV/CCT/UENF.

1 INTRODUÇÃO

A descoberta de transformações martensíticas reversíveis (TMR) em ligas a base de cobre [1-3], de ouro, titânio e outros [4,5], realizadas na área de metalurgia física, serviu como base para explicar com sucesso a natureza de efeitos “anômalos”, como o Efeito de Memória de Forma (EMF) e outros efeitos não elásticos (ENE). Os materiais que apresentam estes efeitos foram adotados pela engenharia e medicina em diversas aplicações [4-6]. As ligas são utilizadas em: junções variáveis, atuadores, conectores elétricos, antenas espaciais. Na área odontológica e medicinal são utilizadas como elementos de força em fios ortodônticos, implantes dentários, dentaduras parciais, placas e arames para fixação de ossos, construção de órgãos artificiais, próteses humanas, etc [5].

Geralmente, TMR ocorrem em sistemas de fases intermetálicas metaestáveis, muitas vezes ordenadas, onde transformações cristalograficamente reversíveis ocorrem com pequena variação na energia de Gibbs do sistema (<100 J/mol) dentro de um estreito intervalo de temperatura (M_s-M_f , no resfriamento, e A_s-A_f , no aquecimento) e com pequena histerese térmica, onde a interface entre as participantes, martensítica e de alta temperatura, permanece coerente ou semi-coerente. Neste tipo de transformação de fase, as lamelas da fase martensítica se acomodam à fase parente, sem apresentar mudanças na composição com temperatura, sendo que, as fases metaestáveis participantes não devem sofrer decomposição e passar para as estáveis [3].

Ultimamente, maior atenção tem sido dada às ligas com TMR da estrutura monocristalina, que mostram maiores parâmetros de EMF e ENE e maior resistência ao acúmulo de deformação elástica não reversível [4]. Entre estas, se destacam as ligas monocristalinas de Cu-Al-Ni com altos parâmetros de EMF, sem sofrer fragilização a tratamento térmico aplicado, de boa formabilidade e plasticidade [4,5].

Para realizar EMF em regime repetitivo, estas ligas requerem múltiplos ciclos de aquecimento e resfriamento num intervalo de temperatura, incluindo as temperaturas críticas de TMR, que podem levar a alterações de estrutura e parâmetros de realização de TMR e EMF [4,5]. Entretanto, estes aspectos têm sido pouco investigados.

No presente trabalho, uma maior atenção é dada a uma liga monocristalina Cu-13,5%Al-4%Ni, à base do composto intermetálico Cu_3Al , em que a fase parente β_1 com estrutura cúbica ordenada do tipo DO_3 , pode se transformar para a fase martensítica γ'_1 ordenada do tipo Cu_3Ti [2-5]. O principal objetivo deste trabalho é estudar as alterações na histerese térmica e na estrutura da liga que ocorrem durante tratamentos termo-cíclicos de resfriamento-aquecimento, livre de tensões externas, num intervalo que abrange as temperaturas críticas de TMR.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A liga monocristalina Cu-13,5%Al-4,0%Ni foi fabricada pelo "Memory Crystals Group", na Universidade Técnica de São Petersburgo, Rússia [6]. A composição química da liga como recebida foi comprovada através da análise de fluorescência de raios-X, utilizando um equipamento de dispersão de comprimentos de onda, modelo SEIFERT VRA-35, com radiação característica de tungstênio.

A identificação da composição de fase da liga foi realizada através da análise de difração de raios-X com radiação de $Cu-K\alpha$, num difratômetro tipo SEIFERT

URD-65, para a faixa de 2θ entre 25° e 130° , com um passo de varredura de $0,03^\circ$ por 3s de acumulação, efetuada em temperatura ambiente de laboratório. Verificou-se que no estado de como recebido, a liga é constituída da fase martensítica γ'_1 , da fase β_1 de alta temperatura e da fase $\text{Al}_7\text{Cu}_4\text{Ni}$ com sistema trigonal [7-10].

A determinação das temperaturas críticas, intervalos de temperatura e efeitos térmicos associados a TMR da liga no estado inicial e após tratamentos cíclicos, foi realizada a partir da análise por calorimetria exploratória diferencial (DSC) num equipamento tipo TA-INSTRUMENTS, modelo DSC-2010. Os testes térmicos foram executados na faixa de temperatura entre -100°C e $+150^\circ\text{C}$ com uma taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$ em atmosfera inerte e resfriamento utilizando o módulo LNCA contendo nitrogênio líquido.

A caracterização metalográfica da liga foi realizada através do microscópio ótico NEOPHOT-32, utilizando as amostras cortadas em um cortador mecânico MINITOM, lixadas e polidas com pastas de alumina com granulometrias de $1\ \mu\text{m}$, $0,25\ \mu\text{m}$ e $0,1\ \mu\text{m}$, sem ataque químico.

Visando que a temperatura ambiente fica dentro da faixa das temperaturas críticas, espera-se alterações da estrutura da liga em função do modo como ela atinge a temperatura ambiente. Para comprovar estas alterações estruturais, uma amostra com a estrutura inicial foi sujeita ao aquecimento em água fervente a $+100^\circ\text{C}$ e ao resfriamento posterior em água à temperatura ambiente e submetida à análise por difração de raios-X. Após a difratometria, a mesma amostra foi resfriada até -15°C , aquecida em água à temperatura ambiente e submetida novamente à análise difratométrica.

A caracterização da estrutura e propriedades da liga foram feitas no estado inicial e após tratamentos termo-cíclicos que incluem 100, 200 e 300 ciclos de aquecimento até $+100^\circ\text{C}$ (acima de A_f), em água fervente, e resfriamento até -15°C (abaixo de M_f), numa mistura criogênica de gelo triturado e NaCl, além do tratamento em água a temperatura ambiente, intercalando as temperaturas do processo de TTC.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras 1 e 2 apresentam os resultados obtidos por difração de raios-X da liga $\text{Cu-13,5\%Al-4,0\%Ni}$, em seu estado inicial e após tratamentos termo-cíclicos aplicados.

No estado inicial, a liga apresenta duas fases metaestáveis: a fase β_1 de alta temperatura ordenada do tipo DO_3 [7] e a fase martensítica γ'_1 ordenada do tipo Cu_3Ti [8]. A fase ordenada β_1 foi identificada por um intenso reflexo (331), enquanto a fase martensítica γ'_1 por dois reflexos (111) e (122) de intensidades similares, porém menores que o reflexo (331) da fase β_1 . Além destes reflexos, na posição angular de $2\theta=29,6^\circ$ encontra-se um pico de difração adicional que provavelmente, pertence à fase $\text{Al}_7\text{Cu}_4\text{Ni}$ do sistema trigonal [9,10], visto que, outros picos desta fase são semelhantes com os das fases β_1 e γ'_1 . Já que na estrutura martensítica da liga não há nenhuma evidência microscópica da presença desta fase, o pico adicional pode ser interpretado como um super-reflexo, proveniente da ordenação de átomos de níquel incorporados na rede cristalina da fase β_1 ou γ'_1 .

Vale notar que em sua seção transversal, a liga monocristalina apresenta a estrutura composta por blocos - um bloco quadrado fica no centro e quatro blocos ficam na região periférica da liga [11-13]. Em cada um dos blocos aparece o relevo

martensítico com sua própria orientação, como mostrado na Figura 3(a). As lamelas martensíticas, inteiramente macladas, se cruzam em V, o que é típico para a martensita γ'_1 [1-3]. Nos quatro blocos periféricos, as lamelas martensíticas são mais finas.

A análise calorimétrica (DSC) da liga, no estado inicial, mostrou que, no aquecimento, a transformação $\gamma'_1 \rightarrow \beta_1$ ocorre no intervalo de +9 °C (A_s) a +52 °C (A_f), através de um processo endotérmico com uma entalpia de transformação de fase de 7,36 J/g, Figura 4(a). O processo se desenvolve de modo intensivo (“*on-set*”) a partir de 26 °C (A_o) e apresenta uma temperatura de extremo do efeito endotérmico de +33 °C (A_e), quando o fluxo de calor é máximo. No resfriamento da liga, a transformação $\beta_1 \rightarrow \gamma'_1$ ocorre entre +25 (M_s) e -9 °C (M_f), tendo temperaturas “*on-set*” e de extremo de +18,8 °C (M_o) e +14 °C (M_e), respectivamente, associadas ao processo exotérmico com uma entalpia de 6,04 J/g, Figura 4(b) [11].

Os resultados de DSC mostram que, durante o aquecimento e resfriamento, as temperaturas críticas de TMR (A_s e M_f , A_f e M_s), bem como as temperaturas dos extremos (A_e e M_e) e “*on-set*” (A_o e M_o) não se sobrepõem, evidenciando o fenômeno conhecido como histerese térmica de TMR [11-13]. Como uma medida da histerese térmica foi adotada a diferença entre as temperaturas críticas dos extremos ($\Delta T = A_e - M_e$) determinada em 20 °C. A grandeza de histerese térmica obtida é comparável aos resultados do trabalho de Zengin e co-atores [14] em que foram estudadas as ligas policristalinas de Cu-Al-Ni de composições próximas à liga monocristalina estudada neste trabalho.

Para os tratamentos térmicos realizados, a influência da histerese térmica foi observada através das análises de difração de raios-X ilustradas nas Figuras 1 e 2, onde observa-se que, de acordo com o tratamento final realizado, a liga apresenta diferentes comportamentos estruturais.

Baseando-se na comparação das intensidades dos picos de difração das fases β_1 (331) e γ'_1 (111) presentes na liga no estado inicial e após TTC, pode-se verificar que após o primeiro ciclo de aquecimento e o primeiro ciclo de resfriamento, a quantidade da fase β_1 diminui e da fase martensítica γ'_1 aumenta.

Convém mencionar que, no espectro de difração obtido da liga submetida ao primeiro ciclo de aquecimento, a fase β_1 se manifesta por reflexões adicionais (400) e (200) e a fase martensítica γ'_1 por reflexos adicionais (022) e (011) não presentes no espectro da liga como recebida. No espectro de difração obtido da liga submetida ao primeiro ciclo de resfriamento, a fase β_1 se manifesta por um reflexo adicional (200) e a fase martensítica γ'_1 por reflexos adicionais (022) e (011).

É importante ressaltar também que o super-reflexo ($2\theta = 29,6^\circ$) ainda está presente nos espectros de difração, mas após o primeiro ciclo de aquecimento apresenta menor intensidade, quando comparado ao estado inicial da liga, e após o primeiro ciclo de resfriamento apresenta maior intensidade, quando comparado ao primeiro ciclo de aquecimento da liga.

Na Figura 3(b,c) estão apresentadas as micrografias que mostram o aspecto morfológico da liga submetida ao primeiro ciclo de aquecimento e de resfriamento, evidenciando o relevo martensítico que é típico para TMR ocorridas no aquecimento e resfriamento da liga. Entretanto, na liga submetida ao resfriamento, o relevo martensítico apresenta-se mais desenvolvido.

A influência dos tratamentos termo-cíclicos (TTC) na composição física da liga foi estudada também após a finalização de 100, 200 e 300 ciclos térmicos do

modo como já foi descrito acima (finalização com aquecimento e resfriamento). Os difratogramas obtidos após TTC estão apresentados nas Figuras 1 e 2.

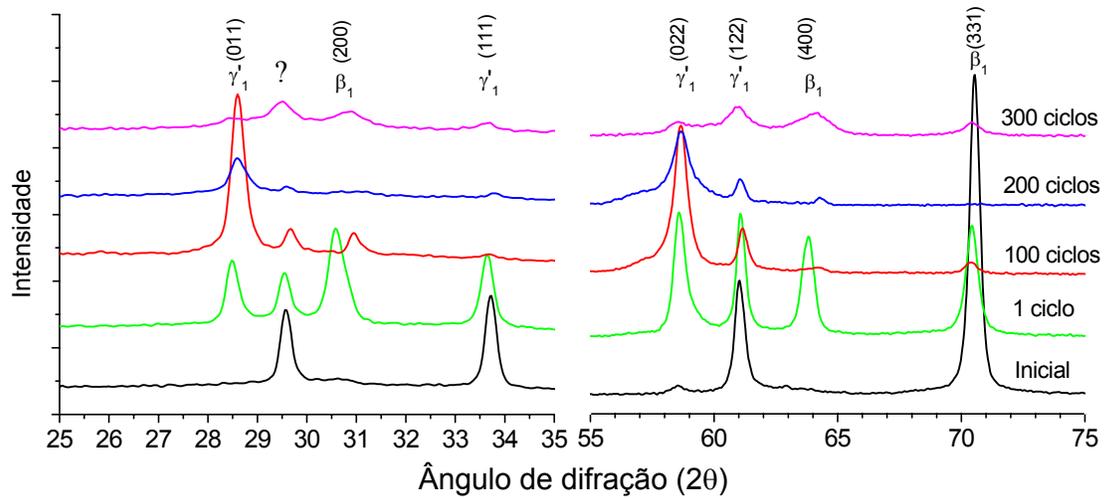


Figura 1. Difratogramas obtidos da liga monocristalina Cu-13,5%Al-4,0%Ni no seu estado inicial e após 1, 100, 200 e 300 ciclos térmicos finalizados com aquecimento da temperatura de -15°C até temperatura ambiente.

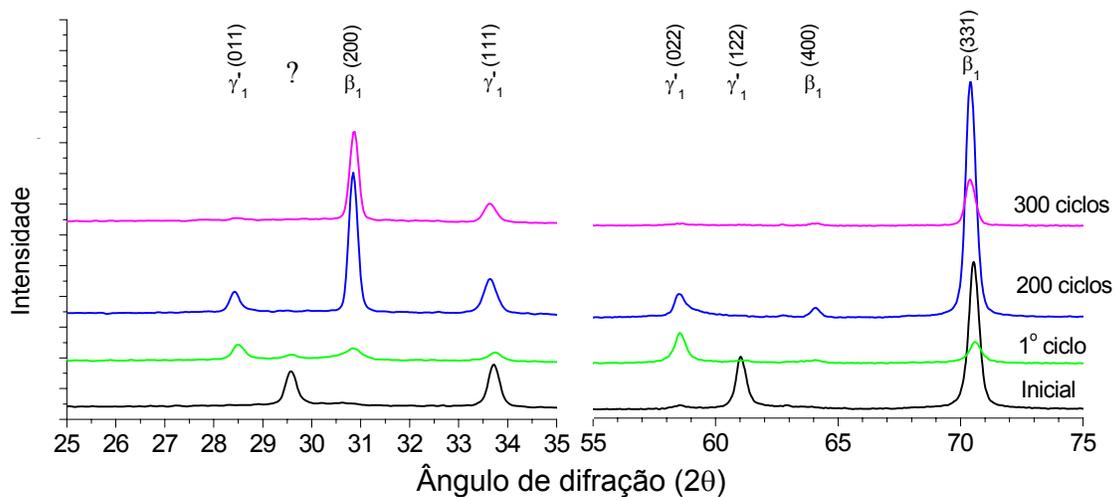
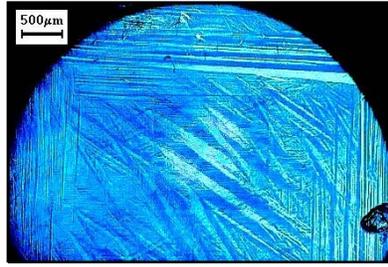


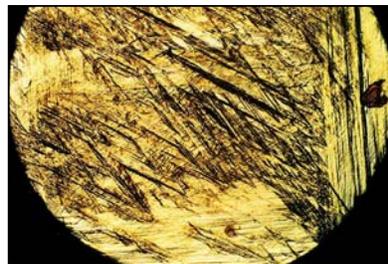
Figura 2. Difratogramas obtidos da liga monocristalina Cu-13,5%Al-4,0%Ni no seu estado inicial e após 1, 200 e 300 ciclos térmicos finalizados com resfriamento da temperatura de 100°C até temperatura ambiente.



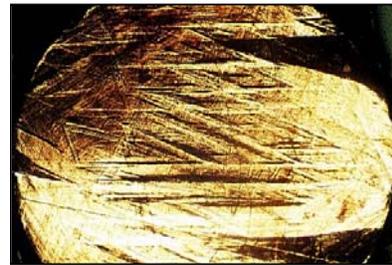
a) Estado inicial



b) Aquecimento



c) Resfriamento



d) Aquecimento



e) Resfriamento

Figura 3. Aspecto morfológico da liga monocristalina Cu-13,5%Al-4,0%Ni no estado inicial (a) e após o aquecimento até +100° C (b,d) e resfriamento até -15° C (c,e), no primeiro ciclo (b,c) e após 200 ciclos térmicos acumulados (d,e).

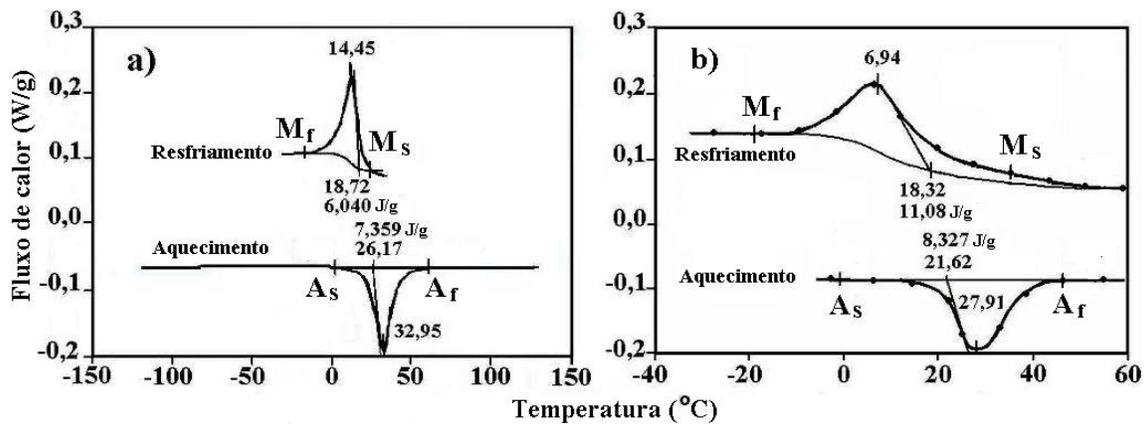


Figura 4. Efeitos térmicos de TMR durante o aquecimento e resfriamento da liga monocristalina Cu-13,5%Al-4,0%Ni: a) estado inicial; b) após 300 ciclos térmicos.

Quando o TTC da liga é finalizado com resfriamento a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ e aquecimento à temperatura ambiente, após 100 e 200 ciclos térmicos, a composição física corresponde às fases β_1 e martensítica γ'_1 , sendo que, a última apresenta picos de maiores intensidades. A comparação das intensidades dos picos de difração mostra que após 300 ciclos térmicos a estrutura da liga revela a fase β_1 e a fase martensítica γ'_1 e ainda permanece o super-reflexo. Vale ressaltar que após 300 ciclos térmicos, os picos das fases mencionadas são bastante largos e os picos da fase β_1 desviados da sua posição original. Esse difratograma provavelmente revela a estrutura em estado intermediário no processo da TMR $\gamma'_1 \leftrightarrow \beta_1$, devido aos defeitos estruturais acumulados na liga durante 300 ciclos, que retardam os processos das TMR e estabilizam o estado transitório na temperatura de observação.

Após 200 ciclos térmicos finalizados com aquecimento a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ e resfriamento à temperatura ambiente, a liga revelou uma alteração na sua estrutura em relação ao primeiro ciclo térmico. Foi notada uma diminuição da fase martensítica γ'_1 a favor da fase β_1 , que se apresentou através dos reflexos (220) e (331) bastante intensos, e a ausência do super-reflexo inicialmente observado. Após 300 ciclos de TTC, a estrutura revelou a presença da fase β_1 , através dos picos intensos (220) e (331), e uma diminuição da fase γ'_1 .

Foi observado que a quantidade de TTC realizados, que variam entre 100, 200 e 300 ciclos também provoca alterações no aspecto morfológico da liga tratada. Na Figura 3(d,e) estão apresentadas as fotos das micrografias da liga quando submetida a 200 ciclos térmicos, finalizando o tratamento com o aquecimento, Figura 3(d), ou com o resfriamento, Figura 3(e). Na superfície das amostras tratadas aparecem linhas de deslizamento adicionais que revelam as transformações martensíticas reversíveis na liga. Em algumas áreas as linhas sofrem superposição, devido à acumulação de defeitos estruturais. Na superfície da liga resfriada, aparece uma agulha em forma de lança que cobre a maior parte da seção da amostra. Na liga aquecida, esta lança sofre a diminuição, revelando a transformação martensítica reversível denominada por Kurdiumov [2] como “transformação martensítica termoelástica”. O mesmo fenômeno foi observado pelo Otsuka e outros pesquisadores [3-5], que atualmente é denominado como transformação martensítica reversível, TMR.

As alterações nas temperaturas críticas acompanham o número crescente dos ciclos térmicos aplicados, ampliando o intervalo total das TMR e deslocando os picos intensivos a temperaturas inferiores, como mostra a Figura 5.

Assim, após os 300 ciclos térmicos aplicados, as temperaturas críticas foram determinadas como $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (M_s), $+18,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (M_o), $+6,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (M_e), $-19,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (M_f), no resfriamento, e $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (A_s), $+21,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (A_o), $+27,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (A_e), $+53\text{ }^{\circ}\text{C}$ (A_f) no aquecimento, Figura 4(b).

Observou-se que as temperaturas críticas A_e e M_e se deslocam ligeiramente a valores mais baixos, em até 5 a $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ no final de tratamento, Figura 5. Entretanto, a grandeza da histerese térmica de TMR, mesmo após 300 ciclos permanece entre 20 - $21\text{ }^{\circ}\text{C}$, não se alterando. Ainda foi notado que o intervalo M_o - M_e no estado inicial de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, aumenta até $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ no final de 300 ciclos, e o intervalo A_o - A_e , no início de $7\text{ }^{\circ}\text{C}$, permanece quase que constante. A temperatura M_s se desloca para valores mais altos, aumentando o intervalo M_s - M_o com os ciclos realizados.

A influência da quantidade de TTC nas temperaturas críticas das TMR é bastante complexa [4,5,15] e ainda deve ser melhor investigada. Entretanto, nota-se um ligeiro desvio das temperaturas críticas das TMR a temperaturas mais baixas,

exceto M_s , e um aumento do intervalo inicial da transformação martensítica direta, mais notável acima de 200 ciclos.

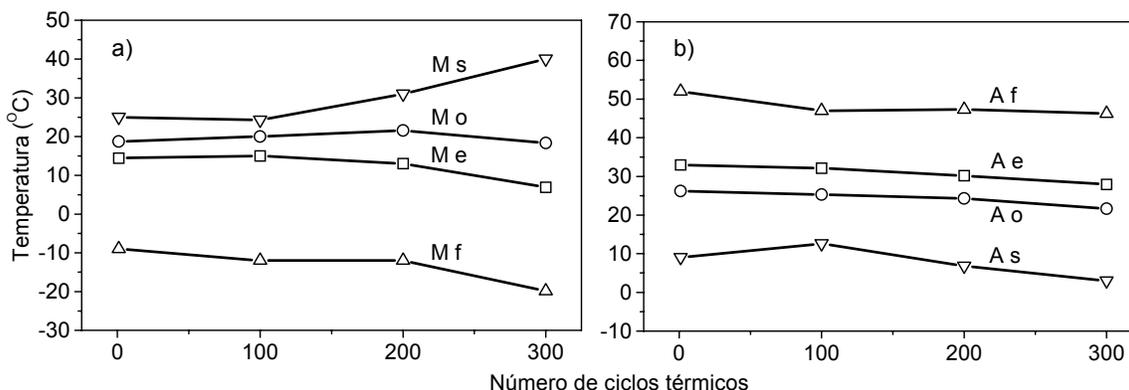


Figura 5. Temperaturas críticas de TMR obtidas por DSC durante o aquecimento (a) e resfriamento (b) da liga em função do número de ciclos térmicos aplicados.

4 CONCLUSÕES

A liga monocristalina Cu-13,5%Al-4,0%Ni, com EMF, sofre TMR $\beta \leftrightarrow \gamma'_1$ no intervalo de 9 a 52° C, sob aquecimento (A_s - A_f) e de 25 a -9° C sob resfriamento (M_s - M_f), possuindo histerese térmica de 20° C.

Após TTC de 300 ciclos, nota-se um pequeno desvio das temperaturas críticas M_o , M_f , A_o e A_s a valores mais baixos (em até 10 °C) e M_s a mais altos, ampliando o intervalo térmico das TMR. As temperaturas críticas A_e e M_e diminuem de 5 a 7° C, porém, não alteram a histerese térmica.

A histerese térmica provoca mudanças na fração volumétrica das fases participantes da TMR, dependendo de como foi finalizado o tratamento termo-cíclico.

Após 300 ciclos, finalizado com o aquecimento acima de A_f , notou-se presença maior da fase β_1 , revelando uma diminuição das temperaturas críticas de desenvolvimento intensivo das TMR. Finalizado com o resfriamento abaixo de M_f , observa-se uma estrutura intermediária no processo $\gamma'_1 \rightarrow \beta_1$, devido aos defeitos estruturais acumulados que retardaram TMR e estabilizam o estado transitório na temperatura de observação.

Baixa taxa de alterações das temperaturas críticas indica boa resistência da estrutura da liga investigada a mudanças não reversíveis durante os TTC.

Agradecimentos

Os pesquisadores agradecem o apoio a esta pesquisa concedido pela FAPERJ, CAPES e CNPq.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. KURDIUMOV, G.V. Transformações martensíticas adifusionais em ligas. **Jornal de Física Técnica**, v. 18, n. 8, p. 999-1025, 1948.
2. KURDIUMOV, G.V., HANDROS, L.G. O equilíbrio de fases termoelástico e transformações martensíticas. **Relatórios da Academia de Ciências da SSSR**, v. 66, n. 2, p. 211-215, 1949.
3. OTSUKA, K. Origin of memory effect in Cu-Al-Ni alloy. **Japanese J. of Applied Physics**, v. 10, n. 5, p. 571-579, 1971.
4. PERKINS, J. (Ed.). In: Proceedings of the International Symposium on Shape Memory Effects and Applications. **Shape memory Effects in Alloys**. Toronto, Ontario, Canada, 470 p., 1975.
5. OTSUKA, K., WAYMAN, C.M. (Ed.). **Shape Memory Materials**. Cambridge University Press. Cambridge. 285 p., 2000.
6. PRIADKO, A., PULNEV, S., VIAHHI, I., VETROV, V., YUDIN, V. In: Proceedings of the Institute of Robotics and Technical Cybernetics. **Actuators and Drives Based on Cu-Al-Ni Shape Memory Single Crystals**, St-Petersburg, Russia, 21p., 2000.
7. HUND, F., ANORG, Z., *Allg. Chem.*, 258, n. 198, JCPDS 11-0, 1949.
8. KARSSON, J., *Inst. Met.*, 79, n. 391, JCPDS 07-0108, 1951.
9. BOWN, M., *Acta Crystallogr.*, 9, n. 70, JCPDS 28-0016, 1956.
10. Disponível em: <http://cecm.insa-lyon.fr/CIOLS/crystal4.pl>
11. MATLAKHOVA, L.A., MATLAKHOV, A.N., RODRÍGUEZ, R.S., MONTEIRO L.S.G., DIAS F.R.M. Alterações estruturais de ligas monocristalinas Cu-Al-Ni. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 09 a 13 de Novembro. Natal, RN, Brasil. CBECIMAT, 2002. CD ROOM (N301-005 MEP2), 2002.
12. MATLAKHOVA, L.A., MATLAKHOV, A.N., DIAS, F.R.M., RODRÍGUEZ, R.S., VIAHHI, I., MONTEIRO, L.S.G. Efeito de tratamento termo-cíclico na estrutura das ligas monocristalinas Cu-Al-Ni com EMF. In: 58º CONGRESSO ANUAL DA ABM, 21 a 24 de julho. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. ABM, 2003. CD ROOM, p. 3054-3061, 2003.
13. MATLAKHOVA, L. A., DIAS, F. R. M., MATLAKHOV, A. N., RODRÍGUEZ, R. S., CASTILLÓ, T. E., TOLEDO, R., LIMA, J. A. P., MIRELLES, L. A. M., PEREIRA, E. C. Transformações martensíticas em ligas monocristalinas Cu-Al-Ni solicitadas a tratamentos termo-cíclicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, PUCRS, 28 de Novembro a 02 de Dezembro. Porto Alegre, RS, Brasil. CBECIMAT, 2004. CD ROOM (N1355), p. 1-7, 2004.
14. ZENGİN, R., OZGEN, S., CEYLAN, M. Oxidation behaviour and kinetic properties of shape memory CuAl_xNi_4 ($x=13.0$ and 13.5) alloys. **Thermochimica Acta**, A 414, p. 79-84, 2004.
15. MORIN M., TRIVERO F. Influence of thermal cycling on the reversible martensitic transformation in Cu-Al-Ni shape memory alloy, **Materials Science and Engineering**. A 196, p. 177-181, 1995.

THERMAL HYSTERESIS OF THE REVERSIBLE MARTENSITIC TRANSFORMATIONS IN SINGLE CRYSTALLINE Cu-Al-Ni ALLOY

*Elaine Cristina Pereira
Lioudmila Aleksandrovna Matlakhova
Anatoliy Nikolaevich Matlakhov
Rosane Toledo
Ruben J. S. Rodríguez
Fátima Rúbia de Matos Dias*

Abstract

In this work it was studied a single crystalline Cu-13,5%Al-4%Ni alloy with shape memory effect submitted the thermal cycles treatments (TTC), that it includes 100, 200 e 300 cycles, of cooling-heating, in an interval that it encloses the critical temperatures of reversible martensitic transformations (TMR). More attention was given to the study of the alterations of its structure and the thermal hysteresis of TMR. The alloy was manufactured by the company "Memory Crystals Group", in Russia. The thermal hysteresis, as well as critical temperatures of the TMR, have been studied from the differential scanning calorimeter (DSC). In the structural characterization of the alloy have been involved optical microscopy and the analysis of X-ray diffraction. The TTC have been carried through in a free system of applied tensions, which revealed that the alloy cooled or warmed, below and above of the critical temperatures M_f and A_f present in the room temperature, an alteration in its structure due to thermal hysteresis. Os TTC realized promote changes in the structure and fast magnifying and displacement of the critical intervals of the TMR, however, they do not modify the thermal hysteresis.

Key-words: Single crystalline Cu-Al-Ni alloys; Martensitic reversible transformations.