

COLEÇÃO PTC  
DEVOLVER AO BALCÃO DE EMPRÉSTIMO

IPEN-DOC- 5783

7.A.;  
de  
1 da

ESTUDOS EM LIGAS Cu-Ni-Be PARA FINS ELÉTRICOS(1)

Waldemar Alfredo Monteiro (2)

Marcilei A. G. da Silveira (3)

Oswaldo Júlio Junior (4)

ação

SUMÁRIO

Este trabalho apresentará os resultados dos estudos microestruturais, mecânicos e elétricos realizados em ligas Cu-Ni-Be após tratamentos térmicos e mecânicos. As ligas utilizadas neste trabalho foram fundidas, com material de alta pureza, em forno de arco voltaico (Cu-2,2%Ni-x%Be onde  $x = 0,1; 0,3; 0,6$ ). As ligas foram homogeneizadas a 955 °C por uma hora em forno de resistência com atmosfera de argônio e têmpera em água. Do material homogeneizado foram produzidas várias amostras com 0,85 mm de espessura, posteriormente laminadas a frio com 30% de redução em espessura e envelhecidas a 400 °C por 3 h. Posteriormente foram novamente conformadas a frio (60% de redução) e receberam dois diferentes tratamentos térmicos de envelhecimento (380 e 425 °C) por 6 h. Após cada uma das etapas realizadas, as amostras foram caracterizadas por microscopia óptica e eletrônica, microanálise (EDS e EELS) e ensaios de microdureza e de resistividade elétrica. O processamento térmico e mecânico empregado resultou em melhoria das propriedades mecânicas e à condutividade elétrica da liga principalmente devido a presença de dois tipos de beriletos distribuídos ao acaso no interior da matriz.

(1) Contribuição técnica submetida ao IV SEMINÁRIO SOBRE MATERIAIS MAGNÉTICOS E ELÉTRICOS, ABM, 28 a 29 de Abril, 1994

(2) Membro da ABM, MSc, DrSc, Chefe da Divisão de Materiais Metálicos (MMM) Professor da CPG do IPEN-USP

(3) Bolsista de Iniciação Científica, CNPq/RHAE

(4) MSc, Engenheiro Metalúrgico, IPEN

A liga cobre-berílio tem uma grande variedade de composições que apresenta boa propriedade mecânica e elétrica. A melhoria da propriedade mecânica se deve ao endurecimento por precipitação após tratamentos térmicos destas ligas. Dependendo da sua utilização, elas poderão ter pequenas adições de outros elementos tais como Co, Ni, Pb que incrementarão sua resistência mecânica sem prejudicar sensivelmente as propriedades elétricas. Assim sendo, devido a sua excelente resistência mecânica e elasticidade combinadas com boa conformabilidade além da permanência de boa propriedade elétrica, as ligas Cu-Be são muito utilizadas na fabricação de condutores de corrente, conectores de alto desempenho, peças de compressores na indústria nuclear, microcontactos (1-3). Neste trabalho foi utilizada a liga Cu-2,2%Ni-x%Be (x = 0,1; 0,3; 0,6) que além das propriedades supracitadas tem também aspectos econômicos favoráveis devido a substituição do elemento cobalto, normalmente utilizado em ligas comerciais empregadas nestas aplicações (ligas Cu-Be-Co). Este trabalho apresentará os resultados dos estudos realizados em ligas Cu-Ni-Be com relação ao processamento bem como caracterização mecânica, microestrutural (inclusive microanálise) e elétrica.

#### PARTE EXPERIMENTAL

A composição da liga usada neste trabalho foi Cu-2,2%Ni-x%Be, onde x = 0,1; 0,3; 0,6. As ligas em questão foram fundidas com material de alta pureza em forno a arco voltáico. Foram homogeneizadas a 955 °C por 1 h em forno de resistência com atmosfera de argônio (têmpera em água). Do material homogeneizado foram produzidas várias lâminas de 0,85 mm de espessura, conformadas a frio (35% de redução em espessura) e em seguida envelhecidas a 400 °C por 3h. Estas lâminas foram novamente conformadas a frio com 60% de redução em espessura e separadas em dois lotes: o primeiro foi envelhecido a

380 °C por 6h e o segundo a 425 °C por 6h . A avaliação mecânica foi feita por meio de ensaios de microdureza Vickers ( Máquina Wolpert ) , com carga de 0,2Kg , em amostras polidas mecanicamente . A caracterização microestrutural e mecânica foi realizada em todas as etapas do processamento térmico e mecânico para podermos acompanhar a formação dos intermetálicos necessários à melhoria da liga . Foi utilizada metalografia óptica e eletrônica bem como microanálise ( Difração eletrônica selecionada , EDS e EELS ) e ensaios de condutividade elétrica . O ataque químico utilizado para a observação metalográfica foi nital 5% ; para a obtenção das fôlhas finas utilizadas em MET (discos de 3mm de diâmetro e 0,15 mm de espessura) foi feito polimento eletrolítico ( Tenupol / Struers ) com uma solução de metanol e ácido nítrico . As observações microestruturais e a identificação dos precipitados foram feitas nos microscópios JEM 200C , JEM 2000FX11 e TOPCON 002B (200kV). Espectroscopias " EDS " e " EELS " foram realizadas em precipitados que se encontravam nas regiões muito finas da área perfurada das amostras afinadas para microscopia eletrônica de transmissão ( elétrons com 200 kV de aceleração ). Utilizou-se a aproximação Cliff- Lorimer (4) para análise química e as análises foram feitas em pelo menos quatro partículas de cada tipo de precipitado .

Para os ensaios de condutividade elétrica foi utilizado o método de 4 terminais empregando um " Milliohmmeter " da Hewlett Packard modelo 4328A . As dimensões utilizadas foram : 2,0 cm x 0,40 cm x 0,25 mm .

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 1 mostra a microestrutura obtida por microscopia óptica (MO) da liga Cu-2,2%Ni-0,6%Be " bruta de fundição " , onde se vê estrutura dendrítica e presença de inclusões . Na figura 2 temos a microestrutura obtida por MO da mesma liga após solubilização , onde se vê distribuição equiaxial dos grãos e também presença de maclas térmicas. Na figura 3 temos a microestrutura desta mesma liga solubilizada e laminada a frio ( 30% de redução ) . A figura 3a , obtida por MO , pode-se observar grãos ligeiramente alongados e também constatar a

figura 3b, obtida por microscopia eletrônica de transmissão (MET) observa-se o arranjo celular formado no interior dos grãos (presença elevada de discordâncias). A figura 4 apresenta microestrutura obtida com a liga Cu-2,2%Ni-0,6%Be após tratamento térmico de pré-envelhecimento a 400 °C por 3h. Na micrografia óptica, figura 4a, não se observa mudanças substanciais, relativamente à figura 3a, enquanto que a micrografia eletrônica, figura 4b, pode-se ainda notar a presença do arranjo celular onde está ocorrendo a precipitação de beriletos junto a discordâncias bem como no interior das células. A figura 4c, também obtida por MET, vê-se a presença de precipitados de berileto que foram identificados por meio de difração eletrônica de área selecionada e microanálise por EDS constatando-se que são ricos em níquel, de dimensões menores que os precipitados existentes desde a etapa de solidificação da liga. A figura 5 apresenta a micrografia eletrônica da liga CuNiBe com 0,6% de Be pré-envelhecida e laminada a frio com 60% de redução em espessura. Tem-se a presença de bandas de deformação além de beriletos. O resultado dos tratamentos térmicos de envelhecimento nas ligas CuNiBe podem ser observados na sequência da figura 6. A figura 6a apresenta microestrutura obtida por MO da liga envelhecida a 380 °C por 6h e a figura 6b quando a liga é envelhecida a 425 °C por 6h. Nota-se refino de grão em ambos os casos e não há diferença significativa entre as duas microestruturas quer opticamente quer eletronicamente. Isto ocorreu nas duas ligas CuNiBe com as composições de 0,3 e de 0,6% de Be enquanto que a de menor composição de Be estudada pouco se diferencia da liga binária CuNi. A figura 6c é uma micrografia eletrônica da liga envelhecida onde se observa beriletos ricos em níquel e que é um dos principais responsáveis pelo aumento de resistência mecânica das ligas Cu-Ni-Be como pode ser constatado pelos valores obtidos nos ensaios de microdureza Vickers e apresentados na tabela 1, onde os mesmos foram obtidos após cada uma das etapas realizadas durante os tratamentos termomecânicos. Pode-se observar que os valores são muito próximos entre as ligas com 0,3% e 0,6% de Be enquanto que para a liga com apenas 0,1% ocorre mudanças pouco significativas entre as várias etapas de processamento realizadas. O aumento da resistência mecânica observada nas ligas Cu-2,2%Ni-0,3%Be e Cu-2,2%Ni-0,6%Be é um forte indicio da presença de beriletos na matriz de Cu. Em trabalho complementar, P. Bandaru, F. Cosandey e W.A. Monteiro encontraram dois diferentes tipos de beriletos que estão distribuídos ao acaso na matriz e que por sua vez são ricos em níquel e apresentam estrutura cristalina B2 (5).

As três ligas foram também analisadas por meio de espectroscopia por perda de energia de elétrons ( "EELS" ) para poder-se constatar a presença do elemento Be nos chamados precipitados intermetálicos ( beriletos ) que se distribuem pela matriz de cobre e que ajudam no aumento da resistência mecânica destas ligas após tratamentos termomecânicos convenientes . Nestas análises foi constatada a presença de Be nos referidos precipitados apenas nas ligas Cu-2,2%Ni-0,3%Be e Cu-2,2%Ni-0,6%Be , podendo indicar que para a formação de beriletos o limite mínimo de Be pode estar próximo de 0,3% ( 6 ) .

Os valores sobre condutividade elétrica obtidos nas ligas envelhecidas situaram-se entre 45% IACS e 62% IACS . As medidas elétricas estão coerentes com as microestruturas obtidas bem como com resultados encontrados por outros autores na literatura ( 7 ) . A presença da subestrutura de discordâncias parece contribuir decisivamente no aumento da resistência mecânica encontrada ( nos valores de microdureza ) .

## CONCLUSÕES

A sequência de tratamentos térmicos e mecânicos desenvolvida para as ligas Cu-Ni-Be , consistindo de solubilização , pré-envelhecimento , laminação a frio e envelhecimento contribuíram decisivamente na melhoria das propriedades mecânicas e da condutividade elétrica . As observações microestruturais por microscopia eletrônica de transmissão mostraram que a realização dos tratamentos escolhidos introduziram uma precipitação fina junto aos emaranhados de discordâncias ( arranjo celular que foi formado durante o processo de laminação a frio ) . A identificação dos precipitados foi feita por análise de "EDS " ( raios-X ) e de difração eletrônica por área selecionada identificando-se dois tipos de precipitados do tipo berileto , ricos em níquel e tem a estrutura cristalina B2 . O tamanho e distribuição dos precipitados variam de acordo com o tratamento térmico de envelhecimento final que por sua vez propicia melhoria na resistência mecânica da liga tornando-a adequada para a finalidade a que ela se destina bem como os valores da condutividade elétrica encontrados ( conectores elétricos de alto desempenho )

Os autores gostariam de agradecer ao Eng. Peter Kopolt, Max-Planck-Institut / Stuttgart (Alemanha). Ao Dr. Frederic Cosandey, Rutgers University (USA). Ao RILAE / CNPq pela bolsa de iniciação científica ao segundo autor. Ao colega Valter Ussui pela colaboração durante a redação deste trabalho.

#### ABSTRACT

The Cu-Ni-Be alloy belongs to the family of precipitation hardening copper alloy and is noted for its excellent combination of strength and electrical conductivity. This paper presents results obtained from mechanical and microstructural tests from the various thermo-mechanical treatments realized in a laboratory obtained Cu-2,2%Ni-0,6%Be alloy. The strengthening of the alloy is attributed to the precipitation of a nickel-beryllium intermetallic phase out of the supersaturated solid solution of beryllium and nickel in copper that was formed during the water quench from the solutionizing temperature.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Ratisbonne, R., "Une Famille Originale: Les Alliages de Beryllium", Matériaux et Techniques, septembre 1987, pag 373-382.
- (2) Burger, J.R., "Beryllium Copper Keeps Pace With Electronics", MBM, november 1989, pag. 45 - 47.
- (3) Dunlevey, F., "Welding & Fabrication", march 1989, pages. 83-84.

- (4) Lorimer, G.W., Al-Salman, S.A. and Cliff, G., "Developments in Electron Microscopy and Analysis", ed. D.L. Misell. I.O.P. London, pag. 369, 1977.
- (5) Bandaru, P., Cosandey, F. and Monteiro, W.A., "The Effect of Thermomechanical Treatment on The Microstructure of a Cu-Ni-Be Alloy", a ser enviado para publicação.
- (6) Monteiro, W.A., Silveira, M.A.G., Júlio Jr., O., "Espectroscopia 'EELS' de Ligas Cu-Ni-Be", Anais do III Micromat, Rio de Janeiro, out. 1992, pag. 161 - 164.
- (7) Rotem, A., Shechtman, D. and Rosen, A., Metallurgical Transactions A, vol.19A, sept. 1988, pags 2279-2285.

FIGURAS

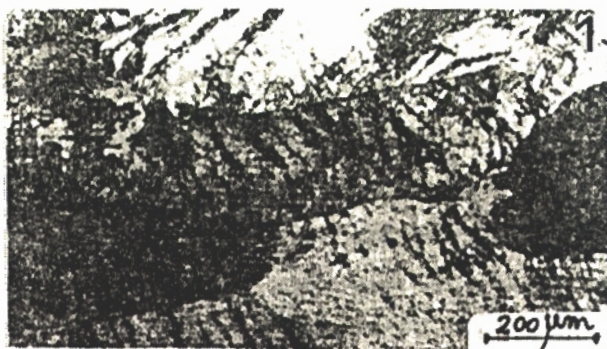


Figura 1. Micrografia Óptica : Microestrutura da liga Cu-2,2%Ni-0,6%Be após solidificação. Vê-se crescimento dendrítico bem como presença de inclusões.

Figura 2. Micrografia Óptica : Microestrutura da liga Cu-2,2%Ni-0,6%Be solubilizada (955 °C x 1h) ; distribuição equiaxial dos grãos e presença de maclas térmicas.

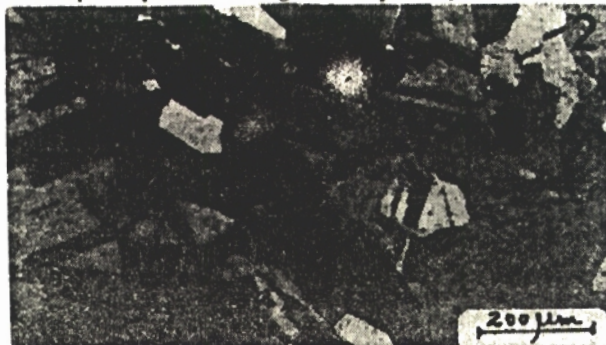


Figura 3a Micrografia Óptica: Microestrutura da liga Cu-2,2%Ni-0,6%Be solubilizada e conformada a frio (30% red. espessura). Grãos levemente alongados e presença de beriletos.



Figura 3b. Micrografia Eletrônica (MET): Microestrutura da liga Cu-2,2%Ni-0,6%Be solubilizada e conformada a frio(30%). Formação celular no interior dos grãos.

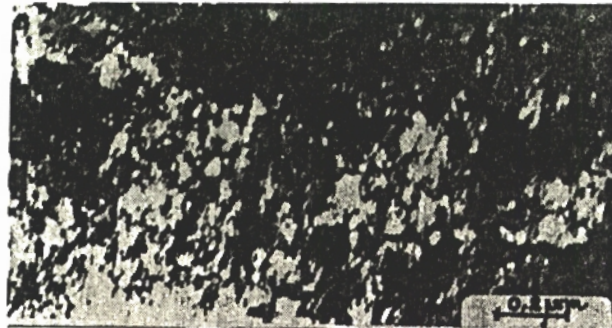


Figura 4a. Micrografia Óptica : Microestrutura da liga Cu-2,2%Ni-0,6%Be solubilizada, laminada a frio (30%) e pré-envelhecida (400 °C x 3h). Aspectos semelhantes aos da figura 3a.



Figura 4b. Micrografia Eletrônica (MET) : Microestrutura da liga Cu-2,2%Ni-0,6%Be pré-envelhecida. Precipitação preferencial junto às discordâncias



Figura 4c. Micrografia Eletrônica (MET) : Microestrutura da liga Cu-2,2%Ni-0,6%Be pré-envelhecida (400 °C x 3h). Presença de precipitados tipo berleto.

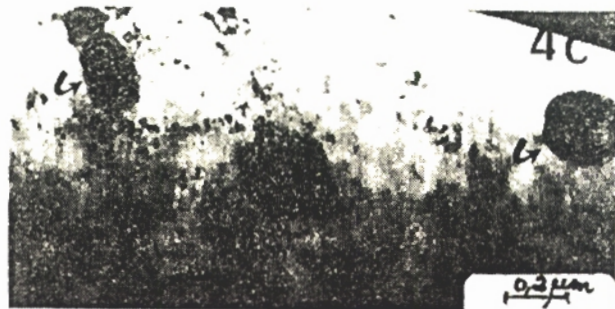


Figura 5. Micrografia Eletrônica (MET) : Microestrutura da liga Cu-2,2%Ni0,6%Be pré-envelhecida seguida de laminação a frio (60% red. espessura). Bandas de deformação e presença de berletes.

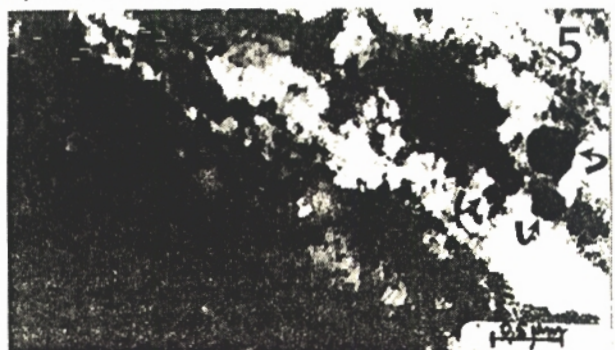


Figura 6a. Micrografia Óptica : Microestrutura da liga Cu-2,2%Ni-0,6%Be envelhecida a 380 °C por 6 h. Observa-se refino de grão devido principalmente a presença de precipitados tipo berileto

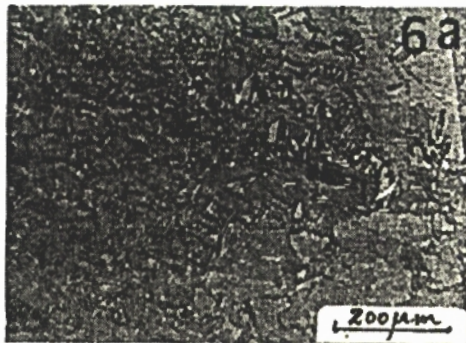
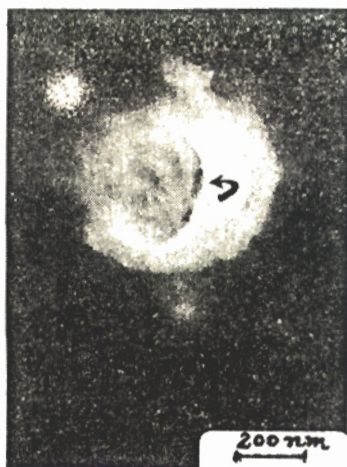


Figura 6b. Micrografia Óptica : Microestrutura da liga Cu-2,2%Ni-0,6%Be envelhecida a 425 °C por 6 h . Refino de grão pela presença de beriletos que colabora no aumento da resistencia mecânica .

Figura 6c. Micrografia Eletrônica (MET) : Microestrutura da liga Cu-2,2%Ni-0,6%Be envelhecida a 425 °C por 6h . Presença de beriletos.



Ligas CuNiBe	Cu-2,2%Ni-0,1%Be	Cu-2,2%Ni-0,3%Be	Cu-2,2%Ni-0,6%Be
solubilização (955°C x 1h)	53,4	52,4	55,3
solubilização , laminação 30%	65,4	88,5	90,4
solub., lam. 30% , pré-envelhecimento (400°C x 3h)	62,3	135,4	111,4
sol. , lam. 30% , pré-env., laminação 60%	76,2	154,2	155,0
sol., lam. 30% , pré-env., lam. 60% , env. final a 380°C x 6h	53,2	76,3	77,6
sol., lam. 30% , pré-env., lam. 60% , env. final a 425°C x 6h	54,2	72,4	73,0

TABELA 1. Medidas de Microdureza Vickers ( valores médios ) das ligas Cu-Ni-Be ( carga = 100 g ).