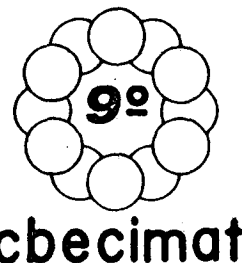




PROCESSAMENTO TERMOMECÂNICO DE LIGAS Cu-Ni-Be*



Waldemar Alfredo MONTEIRO
COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
C.P. 11049 - Pinheiros - 05499 - São Paulo - Brasil



As ligas Cu-Ni-Be pertencem à família das ligas de cobre com endurecimento por precipitação e se destacam por sua excelente combinação de resistência mecânica e condutividade elétrica. Apresentamos neste trabalho resultados obtidos por ensaios mecânicos e microestruturais de diversas etapas (processos termo-mecânicos) realizadas em uma liga Cu-2,2%Ni-0,6%Be obtida em laboratório. O precipitado endurecedor é uma fase intermetálica de níquel-berílio.

INTRODUÇÃO

As ligas cobre-berílio tem uma grande variedade de composições que apresentam boas propriedades mecânicas e elétricas. tais ligas podem conter berílio no intervalo desde 0,1% até 3% em peso, o que trará melhoria nas propriedades mecânicas em razão do endurecimento por precipitação devido a tratamentos térmicos destas ligas. Dependendo da sua utilização, estas ligas poderão ter pequenas quantidades de outros elementos como o cobalto, o níquel, o chumbo, etc., que incrementarão a resistência mecânica delas sem prejudicar sensivelmente as propriedades elétricas. Assim sendo, as ligas Cu-Be, devido a sua excelente resistência mecânica e elasticidade combinadas com uma boa conformabilidade além da boa propriedade elétrica, são muito utilizadas na fabricação de condutores de corrente, conectores de alto desempenho, lâminas de contacto para relês, anéis utilizados em trens de aterrissagem de aviões, peças de compressores na indústria nuclear, na eletrônica como microcontactos, relês e conectores, etc (1-3). Uma das ligas indicadas para as aplicações supra-citadas é a liga Cu-2,2%Ni-0,6%Be, que também apresenta aspectos econômicos favoráveis devido a substituição do elemento cobalto nas ligas comerciais normalmente utilizadas para estas aplicações (ligas Cu-Be-Co).

O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados obtidos com relação às propriedades mecânicas e microestruturais de uma liga Cu-Ni-Be, obtida em laboratório e que sofreu processamento termomecânico resultando em uma boa resistência mecânica bem como boa condutividade elétrica, comparando-se com as ligas Cu-Be-Co comerciais.

PARTES EXPERIMENTAIS

A liga Cu-Ni-Be utilizada neste trabalho foi fundida com material de alta pureza utilizando-se um forno a arco voltaico. A liga pro-

duzida apresentou 2,2% em peso de Ni e 0,6% em peso de Be e o restante de Cu. A liga fundida foi homogeneizada a 955°C por uma hora em forno de resistência em atmosfera de argônio, sendo realizada, em seguida, tempera em água. Do material homogeneizado foram produzidas várias lâminas de 0,85mm de espessura que foram laminadas a frio com 30% de redução em espessura. Em seguida, sofreram um pré-envelhecimento a 400°C por 3 horas. Estas lâminas foram novamente conformadas a frio com 60% de redução em espessura e em seguida foram divididas em dois lotes, o primeiro lote recebeu tratamento térmico de envelhecimento a 425°C por 6 horas e o segundo lote a 380°C por 6 horas.

A caracterização microestrutural e mecânica foi realizada em todas as etapas do processamento termomecânico para podermos acompanhar a formação dos precipitados necessários à melhoria da liga. Foram utilizados metalografia óptica e eletrônica (MET) bem como realização dos ensaios de microdureza além de ensaios preliminares de condutividade elétrica.

O ataque químico utilizado para a observação metalográfica foi Nital 5%. para a obtenção das folhas finas usadas em microscopia eletrônica de transmissão (MET), foi feito um polimento eletrolítico duplo (TENUPOL) como uma solução de metanol e ácido nítrico. As observações microestruturais e a identificação dos precipitados (padrão de difração eletrônica) foram feitos em um microscópio eletrônico de transmissão JEM 200C (200 KV). Para os testes de microdureza Vickers foi utilizada a carga de 100g (máquina WOLPERT).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 1 apresenta os valores encontrados nos ensaios de microdureza nas amostras obtidas após cada uma das etapas realizadas durante os tratamentos termomecânicos da liga Cu-Ni-Be.

Tabela 1. Medidas de microdureza Vickers da liga Cu-Ni-Be

Liga Cu-Ni-Be	Microdureza Vickers (carga:100g)
Após solubilização (955°C x 1h)	55,3
Solubilização (955°C x 1h), laminada 30%	90,4
Solubilizada (955°C x 1h), laminada 30%, pré-envelhecida (400°C x 3h)	111,4
Solubilizada (955°C x 1h), laminada 30%; pré-envelhecida (400°C x 3h); laminada 60%	155,0
Solubilizada (955°C x 1h), laminada 30%, pré-envelhecida (400°C x 3h); laminada 60%; envelhecida (425°C x 6h).	73,0
Solubilizada (955°C x 1h), laminada 30%; pré-envelhecida (400°C x 3h); laminada 60%; envelhecida (380°C x 6h).	77,6

Como podemos observar na tabela 1, os valores obtidos de microdureza após cada etapa, indicam as condições ideais com relação à resistência mecânica da liga Cu-Ni-Be quando comparado com as ligas comerciais (1). A alta resistência mecânica encontrada espera-se ser devido a presença de precipitação de uma fase intermetálica de berílio rica em níquel, fora da solução sólida supersaturada da liga Cu-Ni-Be. Por outro lado, resultados preliminares sobre condutividade elétrica realizada nas ligas envelhecidas indicam valores situados entre 45 e 50% IACS, evidenciando boa expectativa com relação a sua utilização como liga elétrica.

Em complemento foram realizadas análises microestruturais por microscopia óptica e eletrônica. A figura 1 apresenta a microestrutura (microscopia óptica) da liga Cu-Ni-Be após fusão; onde vemos crescimento dendrítico e presença de algumas inclusões. Na figura 2 (a) temos a microestrutura obtida por MO da liga Cu-Ni-Be após solubilização (955°C x 1h), onde vemos uma distribuição equiaxial de grãos além da presença de maclas térmicas. A figura 2 (b) apresenta a microestrutura desta liga, na mesma condição, obtida por microscopia eletrônica de transmissão, obtida por microscopia eletrônica de transmissão (MET) onde podemos observar um contorno de grão além da presença de defeitos cristalinos (principalmente discordâncias) no interior dos grãos. Não há evidências de precipitação intensa. Na figura 3 vemos a microestrutura da liga Cu-Ni-Be solubilizada e laminada a frio (30% de redução): a metalografia óptica, fig. 3 (a), nos mostra os grãos levemente alongados, temos a presença dos chamados berilídeos (precipitados largos) bem co-

mo pode-se contatar no interior dos grãos contrastado devido à laminação a frio. Esta microestrutura quando vista ao MET, evidencia a formação celular no interior dos grãos (presença e levada de discordâncias). A figura 4 apresenta microestrutura obtidas na liga Cu-Ni-Be após tratamento térmico de pré-envelhecimento (400°C x 3h). Na figura 4 (a), obtida por MC, não se constata grandes diferenças em relação à Fig. 3 (a), mas quando observamos esta microestrutura por MET, está presente arranjo celular, Fig. 4 (b), onde ocorre a precipitação junto as discordâncias e também no interior das células. Na figura 4 (c), obtida por MET, temos a presença de precipitados berilídeos ricos em níquel que são menores que os precipitados berilídeos presentes desde a fusão da liga. A perfeita identificação destes precipitados deverá ocorrer em trabalhos posteriores.

A figura 5 nos dá a microestrutura obtida por MET da liga Cu-Ni-Be pré-envelhecida e que sofreu posterior laminação a frio com redução de 60% em espessura. Constata-se a presença de bandas de deformação e uma distribuição uniforme da precipitação (berilídeos).

A microestrutura obtida no envelhecimento das ligas Cu-Ni-Be é apresentada nas figuras seguintes. A figura 6 (a) é a microestrutura da liga envelhecida a 425°C por 6 horas obtida por MO onde se observa o refino de grão ocorrido. A figura 6 (b) apresenta uma micrografia óptica da liga Cu-Ni-Be envelhecida a 380°C por 6h, onde se pode notar refino de grão que não se diferencia do tratamento ocorrido a 425°C. Evidentemente este aspecto só poderá ser melhor discutido por meio de MET. A figura 6 (c) apresenta uma micrografia eletrônica de berilídeo rico em níquel, um dos responsáveis pelo aumento de resistência mecânica da liga Cu-Ni-Be. Finalmente, na figura 6 (d) temos a micrografia eletrônica (MET) dos precipitados tipo β' , presentes uniformemente na microestrutura da liga Cu-Ni-Be envelhecida e que colaboram grandemente no aumento da resistência mecânica desta liga.

Estes resultados ainda são preliminares, mas corroboram com os valores encontrados nos ensaios mecânicos, isto é, a MET evidencia a presença de precipitações que explicam a manutenção das propriedades mecânicas destas ligas. A literatura sobre esta liga tem indicado que o envelhecimento utilizado na liga Cu-Ni-Be causa um aumento na condutividade elétrica e na resistência mecânica como um resultado da precipitação ocorrida e também devido a diminuição de átomos de Ni e Be na matriz de cobre; esse aumento continua com o avanço do envelhecimento até atingir valores máximos de resistência e condutividade para a liga super-envelhecida (7).



Fig.1. Micrografia óptica, microestrutura Cu-Ni-Be após fusão. Vê-se crescimento dendrítico bem como presença de inclusões.



Fig.2(a). Micrografia óptica, microestrutura Cu-Ni-Be após solubilização (955°C x 1h). Distribuição e quiaxial dos grãos; presença de maclas térmicas



Fig.2(b). Micrografia eletrônica (MET), microestrutura Cu-Ni-Be após solubilização. Presença de discordâncias no interior do grão; contorno de grão livre de precipitados.



Fig.3(a). Micrografia óptica, microestrutura Cu-Ni-Be solubilizada e posteriormente conformada a frio (30%). Grãos levemente alongados; presença de berilídeos.



Fig.3(b). Micrografia eletrônica (MET), microestrutura solubilizada e conformada a frio (30%). Formação celular no interior dos grãos.



Fig.4(a). Micrografia óptica, microestrutura Cu-Ni-Be solubilizada, conformada a frio (30%), pré-envelhecida (400°C x 3h). Aspectos aparentemente semelhante à fig.3(a).



Fig.4(b). Micrografia eletrônica (MET), microestrutura Cu-Ni-Be pré-envelhecida. Precipitação preferencial junto a discordâncias.



Fig.4(c). Micrografia eletrônica (MET), microestrutura Cu-Ni-Be pré-envelhecida. Presença de precipitados tipo berilídeos.



Fig.5. Micrografia eletrônica (MET), microestrutura Cu-Ni-Be pré-envelhecida seguida de laminação a frio (60%). Bandas de deformação e distribuição uniforme de precipitados (berilídeos)



Fig.6(a). Micrografia óptica, microestrutura Cu-Ni-Be envelhecida a 425°C por 6 horas. Observa-se o refino de grão.



Fig.6(b). Micrografia óptica, microestrutura Cu-Ni-Be envelhecida a 380°C por 6 horas. Também se observa refino de grão.



Fig.6(c). Micrografia eletrônica (MET) da liga Cu-Ni-Be envelhecida. Presença de berilídeos.

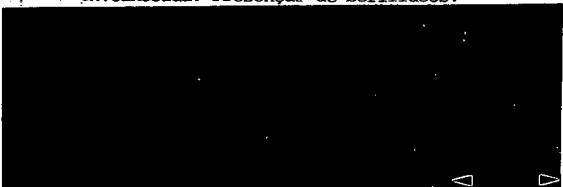


Fig.6(d). Micrografia eletrônica (MET) da liga Cu-Ni-Be envelhecida. Precipitação fina uniformemente distribuída.

CONCLUSÕES

Este trabalho, correspondente a resultados preliminares, revelou que tratamentos termomecânicos realizados na liga Cu-2,2%Ni-0,6%Be consistindo de solubilização; pré-envelhecimento, laminação a frio e envelhecimento melhoraram as propriedades mecânicas da liga além de manter uma boa condutividade elétrica. Pudemos constatar por MET que a realização dos tratamentos termomecânicos introduziram uma precipitação fina junto aos emaranhados de discordâncias (arranjo celular obtido durante o processo laminação a frio). Identificação obtida por difração eletrônica indicam que os precipitados finos são berilídeos, provavelmente ricos em níquel como indica a literatura desta liga (5, 6, 7).

solid solution of beryllium and nickel in copper that was formed during the water quench from the solutionizing temperature.

REFERÊNCIAS

- [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, pags 83-84.
- [4] Tigeot, J., "Revue de Metallurgie", volume 64, 1967, pags 773-784.
- [5] Rotem, A. and Rosen, A., "Metallurgical Transactions A", volume 16 A, november 1985, pags 2073-2077.
- [6] Guha, A., U.S. Patent Number 4.657.601, 14 april 1987.
- [7] Rotem, A.; Shechtman, D. and Rosen, A., "Metallurgical Transactions A", volume 19 A, september 1985, pags 2279-2285.

AGRADECIMENTOS

O autor gostaria de agradecer a colaboração de Sérgio H.F. de Oliveira, bolsista de iniciação tecnológica RHAE/CNPq, durante a realização de várias etapas deste trabalho; bem como aos colegas Glauson Ap. F. Machado (metalografia óptica) e Florinda Vieira (documentação fotográfica).

SUMMARY

The CuNiBe 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