

CONSTRUÇÃO DE FORNO PARA CRESCIMENTO DE MONOCRISTAIS DE COBRE

CLÉIA GUIOTTI DE PÁDUA^a
RICARDO ENRIQUE MEDRANO^b

RESUMO

O estudo das propriedades mecânicas dos sólidos tem sido facilitado pela análise do comportamento de um monocristal. Para crescermos monocristais laminares de cobre, que foram utilizados nos ensaios de deformação no trabalho de tese de mestrado "Estudo Cristalográfico da Deformação Plástica em Monocristais de Cobre", construímos um forno. Neste trabalho são apresentados em detalhes, a construção do forno, o cálculo da resistência e sua fixação, envoltório externo e enchimento do forno, montagem do termopar e do sistema móvel que suporta o forno. Finalmente, é colocado o esquema do forno e seu funcionamento.

PALAVRAS-CHAVE: propriedades mecânicas; monocristal; gradiente de temperatura; perfil do forno.

1 - INTRODUÇÃO

O estudo das propriedades mecânicas dos sólidos tem sido um dos principais objetivos da Física do Estado Sólido. Como a maioria dos sólidos existentes na natureza possui uma estrutura policristalina, complexa, o conhecimento detalhado destas propriedades torna-se bastante difícil. Este estudo é facilitado, no entanto, quando se analisa o comportamento de um monocristal.

Para desenvolvermos o trabalho de tese de mestrado "Estudo Cristalográfico da Deformação Plástica em Monocristais de Cobre", crescemos monocristais laminares de cobre, pelo método de Bridgmann², com algumas modificações. Este método utiliza o fato de que ao se mover uma interface sólido-líquido muito lentamente num forte gradiente de temperatura, toma-se possível obter um único grão em todo o sólido. Para obtermos esse gradiente de temperatura construímos um forno.

Neste trabalho apresentaremos a técnica desenvolvida para a construção do forno.

2 - MATERIAL E MÉTODO

2.1 - Cálculo da Resistência

A resistência de operação do forno pode ser calculada conhecendo-se a diferença de potencial e a potência, pela seguinte expressão

$$R = \frac{V^2}{P} \quad (1)$$

Utilizando-se $V = 220$ volts e $P = 2$ kW, encontramos $R = 24.2 \Omega$. Este é o valor da resistência na temperatura de operação, ou seja 1083°C , alcançada com a utilização do fio de Kanthal A-1. Como a resistência de um material varia com a temperatura, é necessário convertermos este valor de resistência ao correspondente na temperatura ambiente de 20°C . A conversão é feita através da relação:

$$R_{20^\circ\text{C}} = \frac{R(T)}{C_T(T)} \quad (2)$$

O fator de conversão C_T , no caso do fio de Kanthal A-1, é igual a 1.040^3 para $T = 1083^\circ\text{C}$. Com a conversão, obtivemos $R_{20^\circ\text{C}} = 23.3 \Omega$.

A corrente máxima que passa através do fio é dada por:

$$I_{\text{MÁX}} = \frac{V}{R} \quad (3)$$

Usando-se $V = 220$ volts e $R = 24.4 \Omega$ encontramos $I_{\text{MÁX}} = 9.1$ A. A escolha do fio adequado para suportar este valor de corrente, sem ser sobrecarregado, foi feita calculando-se a superfície irradiante (S_1), em cm^2/Ω , através da expressão:

^a Departamento de Física — CCE/Universidade Estadual de Londrina.

^b Instituto de Física - IFGW/UNICAMP.

$$S_i = \frac{I_{MAX} C_T}{\gamma} \quad (4)$$

Substituindo-se $I_{MAX} = 9.1A$, $C_T = 1.040$ e $\gamma = 2W/cm^2$, obtivemos $S_i = 43.06 cm^2/\Omega$. Pelas tabelas Kanthal, o material mais apropriado cuja superfície irradiante se encontra mais próxima desse valor, é o fio de Kanthal A-1 com diâmetro 1.40mm com $S_i = 46.69cm^2/\Omega$.

O comprimento do fio é calculado pela expressão:

$$\ell = \frac{R_{20^{\circ}C}}{0.9419} \quad (5)$$

onde o valor 0.9419 é dado pela tabela Kanthal. Para $R = 23.3\Omega$, encontramos $\ell = 24.5m$. Como não foi possível conseguir um fio de Kanthal com 1,40mm de diâmetro, refizemos os cálculos utilizando-se um fio do mesmo material mas com diâmetro igual a 1.50mm. Neste caso, o comprimento é dado por

$$\ell = \frac{R_{20^{\circ}C}}{0.8205} \quad (6)$$

Finalmente, substituindo-se $R_{20^{\circ}C} = 23.3\Omega$ obtivemos $\ell = 28,40m$.

Este fio foi enrolado de forma helicoidal dando uma bobina de 2.23m de comprimento por 4.9mm de diâmetro. Foram deixados aproximadamente 1m de fio em cada extremidade da bobina para serem usados como terminais. Estas pontas foram dobradas, a fim de se conseguir melhor contato com a fonte de tensão.

2.2 — Colocação e Fixação da Resistência

A resistência de Kanthal, foi obtida enrolando-se a bobina de 2.23m de comprimento, anteriormente obtida, num tubo de alumina de 30cm de comprimento e 4.8cm de diâmetro. Para obtermos um gradiente de temperatura, que, resfriasse a amostra de forma gradativa a partir de sua extremidade pontiaguda, o enrolamento foi feito concentrando-se as espiras numa das pontas do tubo e espaçando-se gradativamente, as demais espiras até cobrir toda extensão do mesmo. Inicialmente foi enrolado um pedaço de papelão de amianto no tubo e, a seguir, a bobina, sendo que cada espira foi intercalada com espiras de cordão de amianto.

Depois de enrolada no tubo, a resistência foi fixada com Fiberfrax da Carborundum, cujas principais características são: temperatura máxima de operação (1260°), condutividade térmica extremamente baixa e densidade baixa.

2.3 — Envoltório Externo e Enchimento do Forno

O forno tem um corpo cilíndrico, feito de folha metálica, com as extremidades fechadas por placas de amianto, como mostra a figura 1. As placas de amianto têm dois orifícios centrais com diâmetros iguais a 48.25mm, conforme figura 2.

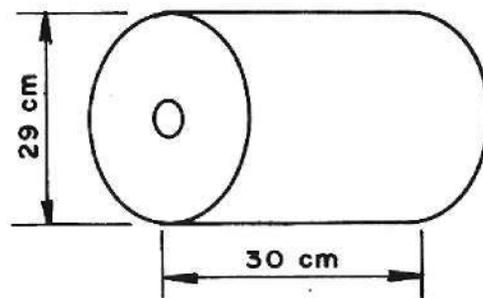


FIGURA - 1. Forno cilíndrico

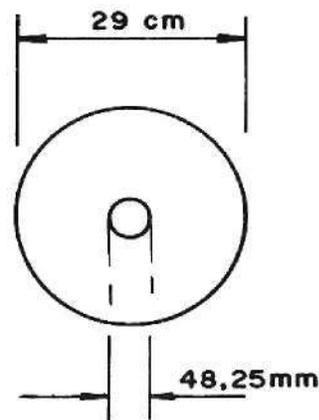


FIGURA - 2. Extremidades do forno

Numa das extremidades do forno, abaixo do orifício central, tem um outro orifício menor, igual a 27.11mm, por onde é introduzido um tubo de alumina fechado num dos lados. É neste tubo que colocamos o termopar.

A resistência, fixada no tubo de alumina de diâmetro igual a 48mm, é introduzida no forno e alinhada com os furos laterais das placas de amianto. Os terminais dessa resistência são revestidos com pastilhas refratárias e saem do forno para serem ligados aos pólos do Variac. Após o alinhamento da resistência, o espaço vazio entre esta e as paredes do cilindro externo é preenchido com material isolante térmico. Pelas dimensões do forno que construímos, o ideal seria usarmos flocos CH, mas, como este material não foi encontrado, utilizamos manta CH. As principais características da manta CH produzida pela Carborundum são: temperatura máxima de operação $1426^{\circ}C$, densidade de $128Kg/m^3$ e espessura igual a 25.4mm.

2.4 - Termopar

O par alumel-cromel é o que se mostrou mais adequado, como termopar, para o controle das temperaturas, de até $1200^{\circ}C$.

A fusão das pontas foi realizada pelo método da solda com arco de eletrodos de grafite, esquematizado na figura 3. Ligando-se o Variac a 220V, formou-se um arco voltaico entre eletrodos de grafite, fundindo-se as pontas dos fios, soldando-as.

A calibração do termopar é feita através de medidas da temperatura em pontos conhecidos.

Para as leituras das temperaturas no interior do forno movimenta-se o termopar, até a posição de temperatura máxima. A referência do termopar é o gelo fundente.

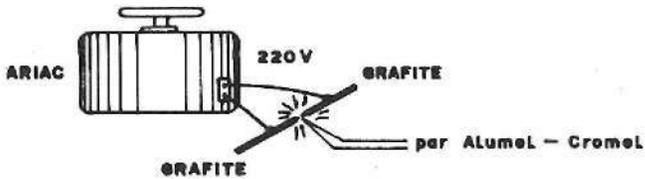


FIGURA - 3. Arco de eletrodos de grafite

2.5 — Suporte Móvel do Forno

Montamos o forno sobre um carrinho com rodas, o qual é colocado sobre um par de trilhos. Desta forma foi possível dar movimento horizontal ao forno e, então, deslocá-lo em relação à amostra, a qual foi mantida fixa.

A velocidade do forno é de 1mm/minuto. Para conseguirmos essa velocidade utilizamos um motor, ao qual foi adaptada uma caixa de redução que liberava rotação, no eixo, igual a 1 rotação/minuto. O acoplamento do motor ao sistema móvel foi feito através de um parafuso de rosca sem fim com aproximadamente 50cm de comprimento e com passo de rosca de 1mm.

3 - RESULTADOS

Na figura 4, está apresentado um esquema completo do forno. Podemos observar que existe uma resistência ligada em paralelo com o relê. Esta é necessária devido à inércia apresentada pelo equipamento. Quando o controlador de temperatura provoca a interrupção da corrente no forno, este, então, passa a ser alimentado por uma corrente menor, conduzida através da resistência. Desse modo conseguimos obter uma variação de temperatura muito pequena no forno, e ainda menor na amostra.

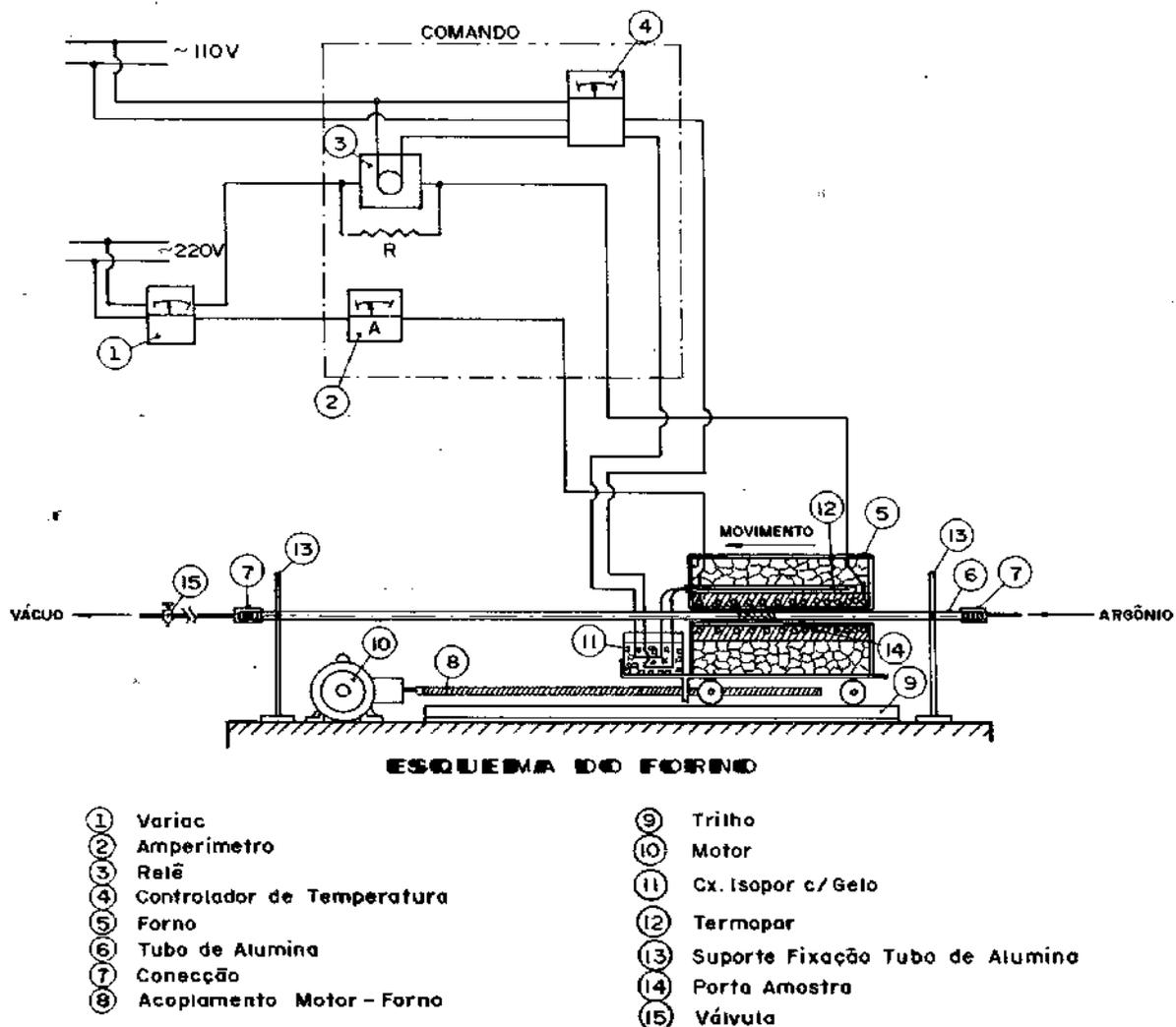


FIGURA - 4. Esquema completo do forno

A distribuição da temperatura do forno em função da posição, ou seja, o perfil do forno, é mostrado na figura 5.

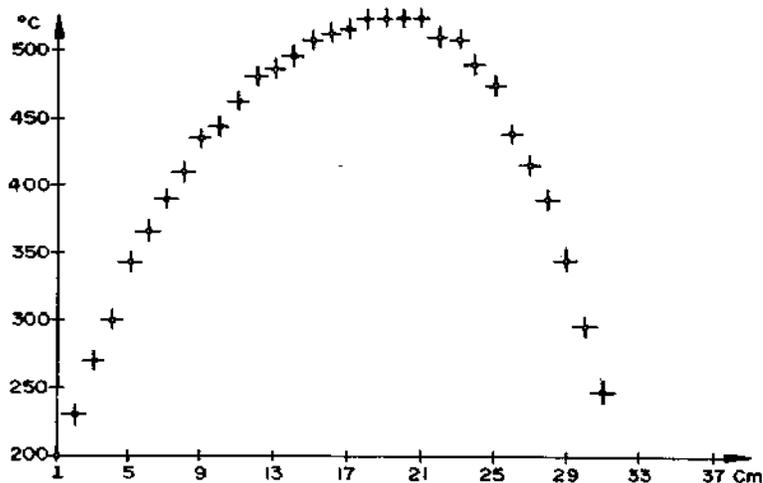


FIGURA - 5. Perfil do forno

4 - DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

O forno foi colocado em operação a uma tensão inicial de 5 volts. Essa tensão foi aumentada de forma gradativa dando-se tempo para que ele se aquecesse adequadamente.

Interrompíamos o aquecimento quando a temperatura atingia e se estabilizava em 1000°C.

A manutenção desta temperatura era feita automaticamente pelo controlador de temperatura através de um relê, que interrompia e acionava o fornecimento de corrente elétrica à resistência, em intervalos regulares de tempo. O valor ideal de tensão aplicada, encontrada experimentalmente, foi de 135 volts. Nesta tensão o forno permanecia ligado e desligado durante iguais intervalos de tempo, dando origem a uma curva de temperatura-tempo periódica e regular em torno de 1000°C.

Sempre que a temperatura do forno se estabilizava em 1000°C, nós o colocávamos em movimento, acionando o motor. O deslocamento do forno em relação à amostra possibilitava que a mesma ocupasse qualquer posição na linha horizontal no interior do forno, indo de uma extremidade à outra. Quando a amostra, após ter passado em todo o interior do forno, saía do mesmo, o motor e o forno eram desligados.

ABSTRACT

The mechanical properties of a solid are frequently studied using its single crystal. A furnace to grow copper single crystal plates has been developed. We present here the details of construction of the furnace, the thermocouple for temperature control and the moving support for the furnace. The calculation of resistance for the furnace, its assembly and thermal isolation have also been discussed. Finally, a flow-chart of the mechanical and electrical system of the furnace is presented.

KEY-WORDS: *mechanical properties; single crystal; furnace.*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - PÁDUA, C. G. *Estudo Cristalográfico da Deformação Plástica em Monocristais de Cobre*. Campinas, Unicamp, 1989. Tese (mestrado).
- 2 - CHALMERS, B. *The preparation of single crystals and bicrystals by the controlled solidification of molten metals*. *Canadian Journal Phys.*, 31, 132, 1953.
- 3 - KANTHAL, M. *Manual Aços Kanthal*. São Paulo, Aços Kanthal Ltda.

Recebido para publicação em 31/10/89