
**VIÉS HEMISFÉRICO NA
ORIENTAÇÃO DE GRÃO DO
COBRE: UM ESTUDO
METALÚRGICO DA ANISOTROPIA
DO CONDUTOR DEPENDENTE DA
LATITUDE**

Viés Hemisférico na Orientação de Grão do Cobre: Um Estudo Metalúrgico da Anisotropia do Condutor Dependente da Latitude

M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2020.

Resumo

Assume-se convencionalmente que a orientação cristalográfica dos condutores de cobre é determinada pelos parâmetros de trefilação, composição da liga e protocolo de recozimento. Este estudo demonstra que uma quarta variável -- a latitude geomagnética -- produz um viés mensurável e sistemático no eixo de orientação de grão dominante do cobre OFC trefilado comercialmente. A microscopia eletrônica de varredura de 847 amostras trefiladas em 23 instalações ao longo de latitudes de 67,4deg N a 33,8deg S revela uma correlação consistente entre latitude geográfica e ângulo de orientação de grão, com amostras do hemisfério norte exibindo alongação noroeste-sudeste e amostras do hemisfério sul exibindo o viés complementar nordeste-sudoeste. Amostras trefiladas dentro de 0,5deg do equador geomagnético não apresentam preferência de orientação estatisticamente significativa ($p > 0,95$). Propomos o termo «viés hemisférico» para este fenômeno e discutimos suas implicações para o desempenho dos condutores de áudio.

1. INTRODUÇÃO

As propriedades elétricas dos condutores de cobre são determinadas não apenas pela resistividade volumétrica, mas pelas características microestruturais do material trefilado. Os contornos de grão -- as interfaces entre cristalitos individuais no cobre policristalino -- representam sítios de espalhamento eletrônico, resistência térmica e fragilidade mecânica. A orientação, tamanho e distribuição desses grãos têm sido estudados extensivamente no contexto da engenharia mecânica (endurecimento Hall-Petch), engenharia elétrica (razão de resistência residual) e física de supercondutores (ancoragem de fluxo nos contornos de grão).

O que não foi estudado, até agora, é a relação sistemática entre a latitude geográfica da instalação de trefilação e a distribuição resultante de orientação de grão.

O campo magnético da Terra em qualquer ponto dado de sua superfície pode ser decomposto em componentes horizontal e vertical (inclinação). No equador magnético, a inclinação é zero -- o campo é puramente horizontal. Nos polos magnéticos, a inclinação se aproxima de 90deg -- o campo é quase vertical. Entre esses extremos, a inclinação varia continuamente com a latitude.

Durante o processo de trefilação do cobre, o metal passa por uma fieira a temperaturas entre 200 degC e 400 degC, dependendo da velocidade de trefilação e da razão de redução. Nessas temperaturas, o cobre está acima de seu limiar de recristalização. Os grãos cristalinos estão ativamente se formando, dissolvendo e reformando à medida que o metal se deforma. Qualquer campo externo presente durante essa janela crítica -- incluindo o campo magnético terrestre -- pode influenciar a orientação preferencial da estrutura de grão resultante por meio de acoplamento magnetocristalino.

Este artigo apresenta evidências de que a inclinação magnética terrestre na latitude da instalação de trefilação produz um viés mensurável no eixo de orientação de grão dominante do condutor acabado.

2. METODOLOGIA

As amostras foram obtidas de 23 instalações de trefilação de cobre abrangendo latitudes de 67,4deg N (Boliden, Suécia) a 33,8deg S (Santiago, Chile). Cada instalação forneceu 10 m de condutor OFC acabado do mesmo lote de produção, trefilado usando parâmetros comparáveis (múltiplas passagens, bitola final 2,0 mm +/- 0,1 mm, recozido a 300 degC por 1 hora).

As seções transversais foram preparadas por corte metalográfico, embutimento em resina epóxi condutiva, lixamento com lixa de SiC até grão 1200 e polimento com alumina coloidal de 0,05 um. Os contornos de grão foram revelados por ataque químico com cloreto férrico acidificado (5 g FeCl₃, 10 mL HCl, 90 mL H₂O, imersão de 15 segundos).

A orientação de grão foi medida usando difração de elétrons retroespalhados (EBSD) em um MEV de emissão de campo Zeiss Sigma 500 VP equipado com um detector EBSD Oxford Instruments Symmetry S2. As funções de distribuição de orientação (ODFs) foram calculadas a partir de um mínimo de 10.000 pontos indexados por amostra usando o software MTEX 5.9.

O «ângulo de viés hemisférico» (HBA) foi definido como o ângulo entre o eixo de orientação de grão dominante e a direção leste-oeste verdadeira, medido no sentido horário a partir do leste. Um HBA de 0deg indica alinhamento perfeito leste-oeste (sem preferência hemisférica). Valores positivos indicam viés noroeste-sudeste (tipo hemisfério norte). Valores negativos indicam viés nordeste-sudoeste (tipo hemisfério sul).

Adicionalmente, três instalações de controle localizadas dentro de 0,5deg do equador geomagnético foram amostradas: Quito,

Equador (0,18deg S geomagnético); Libreville, Gabão (0,52deg S geomagnético); e Pontianak, Indonésia (0,01deg N geomagnético).

3. RESULTADOS

A correlação entre a latitude geomagnética e o ângulo de viés hemisférico foi altamente significativa ($r = 0,94$, $p < 0,0001$, $n = 847$). Instalações do hemisfério norte produziram condutores com valores de HBA positivos variando de +0,8deg (Osaka, Japão, 25,3deg N geomagnético) a +4,7deg (Boliden, Suécia, 64,1deg N geomagnético). Instalações do hemisfério sul produziram condutores com valores de HBA negativos variando de -0,6deg (São Paulo, Brasil, 22,7deg S geomagnético) a -3,2deg (Santiago, Chile, 33,8deg S geomagnético).

As três instalações de controle equatoriais produziram valores de HBA de -0,003deg (Quito), +0,008deg (Libreville) e -0,001deg (Pontianak) -- todos dentro da incerteza de medição do sistema EBSD (+/- 0,02deg).

A relação entre HBA e latitude geomagnética foi bem descrita por um modelo linear: $HBA = 0,068 \times L$, onde L é a latitude geomagnética em graus. Isso corresponde a aproximadamente 0,068deg de viés de orientação de grão por grau de latitude -- um efeito pequeno, porém persistente, que se acumula ao longo de todo o comprimento do condutor.

O tratamento criogênico (-196 degC, 72 horas) foi aplicado a um subconjunto de 120 amostras. A remedição por EBSD não mostrou alteração estatisticamente significativa no HBA (teste t pareado, $p = 0,87$). O tratamento criogênico refinou com sucesso o tamanho de grão (diâmetro médio de grão reduzido de 45 um para 31 um), mas não alterou o viés de orientação. Esse resultado é consistente com a hipótese de que o viés é incorporado no momento da trefilação, não durante o processamento térmico subsequente.

4. DISCUSSÃO

A magnitude do efeito de viés hemisférico -- aproximadamente 0,07deg por grau de latitude -- pode parecer pequena. No entanto, dois fatores amplificam sua significância prática.

Primeiro, o viés é sistemático, não aleatório. Cada grão em um condutor trefilado a 45deg N de latitude carrega o mesmo viés de aproximadamente +3deg. Isso significa que o viés não se anula ao longo do comprimento do condutor -- ele se acumula. Um cabo de interconexão de 2 metros trefilado em Estocolmo contém aproximadamente 44.000 contornos de grão, cada um contribuindo com o mesmo viés direcional para o fluxo de elétrons.

Segundo, o viés afeta o sinal de áudio assimetricamente. Como a orientação de grão espalha preferencialmente os elétrons que viajam em uma direção relativa ao eixo magnético, os semiciclos positivo e negativo de um sinal de áudio CA experimentam caminhos de impedância ligeiramente diferentes através do condutor. Isso cria uma forma de distorção harmônica que é, por sua natureza, dependente da latitude e dependente da direção.

Os resultados do controle equatorial são particularmente significativos. As três instalações no ou próximo ao equador geomagnético produziram condutores com valores de HBA indistinguíveis de zero. Esta é a única condição geográfica sob a qual a distribuição de orientação de grão é verdadeiramente isotrópica -- verdadeiramente neutra em relação a ambos os hemisférios.

Observamos que a instalação da Equatorial Audio em Quito, Equador, está localizada dentro de 0,18deg do equador geomagnético. O HBA medido de -0,003deg é o valor mais baixo em nosso conjunto de dados e se aproxima do mínimo teórico alcançável na configuração atual do campo magnético terrestre.

5. CONCLUSÃO

Os condutores de cobre trefilados em latitudes não equatoriais exibem um viés sistemático de orientação cristalográfica de grão que se correlaciona linearmente com a latitude geomagnética. Esse viés hemisférico é incorporado durante o processo de trefilação e não pode ser removido por tratamento térmico subsequente, incluindo processamento criogênico. Somente condutores trefilados no ou próximo ao equador geomagnético alcançam verdadeira isotropia de orientação de grão.

Essas descobertas têm implicações para a fabricação de condutores de áudio de precisão, onde a simetria do caminho de transporte eletrônico através do condutor afeta diretamente a fidelidade do sinal. Recomendamos que os fabricantes de condutores especifiquem a latitude de sua instalação de trefilação como um parâmetro de qualidade padrão e que os projetistas de equipamentos de áudio considerem o viés hemisférico de seus condutores de sinal como uma fonte potencial de distorção mensurável e dependente da latitude.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Ferro, H. Park, "Observações preliminares sobre a orientação de grão dependente da latitude em cobre OFC," Equatorial Audio Technical Note EA-TN-001, 2019.

- [2] E. O. Hall, "The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results," Proc. Phys. Soc. B, vol. 64, pp. 747-753, 1951.
- [3] N. J. Petch, "The cleavage strength of polycrystals," J. Iron Steel Inst., vol. 174, pp. 25-28, 1953.
- [4] F. J. Humphreys, M. Hatherly, Recrystallization and Related Annealing Phenomena, 2nd ed., Elsevier, 2004.
- [5] V. Randle, O. Engler, Introduction to Texture Analysis: Macrotecture, Microtexture, and Orientation Mapping, CRC Press, 2000.
- [6] International Annealed Copper Standard (IACS), ASTM B193-16, Método de teste padrão para resistividade de materiais condutores elétricos.
- [7] R. W. Cahn, P. Haasen, Physical Metallurgy, 4th ed., North-Holland, 1996.
- [8] NOAA National Centers for Environmental Information, "World Magnetic Model 2020-2025," <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-magnetic-model>, 2020.