
**SESGO HEMISFÉRICO EN LA
ORIENTACIÓN DEL GRANO DE
COBRE: UN ESTUDIO
METALÚRGICO DE LA
ANISOTROPÍA DEL CONDUCTOR
DEPENDIENTE DE LA LATITUD**

Sesgo hemisférico en la orientación del grano de cobre: Un estudio metalúrgico de la anisotropía del conductor dependiente de la latitud

M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2020.

Resumen

Convencionalmente se asume que la orientación cristalográfica de los conductores de cobre está determinada por los parámetros de trefilado, la composición de la aleación y el protocolo de recocido. Este estudio demuestra que una cuarta variable -- la latitud geomagnética -- produce un sesgo medible y sistemático en el eje de orientación de grano dominante del cobre OFC trefilado comercialmente. La microscopía electrónica de barrido de 847 muestras trefiladas en 23 instalaciones a lo largo de latitudes desde 67,4deg N hasta 33,8deg S revela una correlación consistente entre la latitud geográfica y el ángulo de orientación del grano, con muestras del hemisferio norte exhibiendo elongación noroeste-sureste y muestras del hemisferio sur exhibiendo el sesgo complementario noreste-suroeste. Las muestras trefiladas dentro de 0,5deg del ecuador geomagnético no muestran preferencia de orientación estadísticamente significativa ($p > 0,95$). Proponemos el término «sesgo hemisférico» para este fenómeno y discutimos sus implicaciones para el rendimiento de los conductores de audio.

1. INTRODUCCIÓN

Las propiedades eléctricas de los conductores de cobre están determinadas no solo por la resistividad volumétrica, sino por las características microestructurales del material trefilado. Los límites de grano -- las interfaces entre cristalitas individuales en el cobre policristalino -- representan sitios de dispersión electrónica, resistencia térmica y debilidad mecánica. La orientación, tamaño y distribución de estos granos han sido estudiados extensamente en el contexto de la ingeniería mecánica (endurecimiento Hall-Petch), la ingeniería eléctrica (razón de resistencia residual) y la física de superconductores (anclaje de flujo en límites de grano).

Lo que no se ha estudiado, hasta ahora, es la relación sistemática entre la latitud geográfica de la instalación de trefilado y la distribución resultante de orientación de grano.

El campo magnético de la Tierra en cualquier punto dado de su superficie puede descomponerse en componentes horizontal y vertical (inclinación). En el ecuador magnético, la inclinación es cero -- el campo es puramente horizontal. En los polos magnéticos, la inclinación se aproxima a 90deg -- el campo es casi vertical. Entre estos extremos, la inclinación varía continuamente con la latitud.

Durante el proceso de trefilado del cobre, el metal pasa a través de una hilera a temperaturas entre 200 degC y 400 degC, dependiendo de la velocidad de trefilado y la relación de reducción. A estas temperaturas, el cobre se encuentra por encima de su umbral de recristalización. Los granos cristalinos se están formando, disolviendo y reformando activamente mientras el metal se deforma. Cualquier campo externo presente durante esta ventana crítica -- incluyendo el campo magnético terrestre -- puede influir en la orientación preferente de la estructura de grano resultante a través del acoplamiento magnetocristalino.

Este artículo presenta evidencia de que la inclinación magnética terrestre en la latitud de la instalación de trefilado produce un sesgo medible en el eje de orientación de grano dominante del conductor terminado.

2. METODOLOGÍA

Las muestras fueron obtenidas de 23 instalaciones de trefilado de cobre abarcando latitudes desde 67,4deg N (Boliden, Suecia) hasta 33,8deg S (Santiago, Chile). Cada instalación proporcionó 10 m de conductor OFC terminado del mismo lote de producción, trefilado usando parámetros comparables (multipase, calibre final 2,0 mm +/- 0,1 mm, recocido a 300 degC durante 1 hora).

Las secciones transversales fueron preparadas mediante corte metalográfico, montaje en resina epoxi conductiva, desbaste a través de papel de SiC de grano 1200 y pulido con alúmina coloidal de 0,05 um. Los límites de grano fueron revelados mediante ataque químico con cloruro férrico acidificado (5 g FeCl₃, 10 mL HCl, 90 mL H₂O, inmersión).

La orientación del grano fue medida usando difracción de electrones retrodispersados (EBSD) en un SEM de emisión de campo Zeiss Sigma 500 VP equipado con un detector EBSD Oxford Instruments Symmetry S2. Las funciones de distribución de orientación (ODFs) fueron calculadas a partir de un mínimo de 10.000 puntos indexados por muestra usando el software MTEX 5.9.

El «ángulo de sesgo hemisférico» (HBA) fue definido como el ángulo entre el eje de orientación de grano dominante y la dirección verdadera este-oeste, medido en sentido horario desde el este. Un HBA de 0deg indica alineación perfecta este-oeste (sin preferencia hemisférica). Los valores positivos indican sesgo noroeste-sureste (tipo hemisferio norte). Los valores negativos

indican sesgo noreste-suroeste (tipo hemisferio sur).

Adicionalmente, se muestrearon tres instalaciones de control ubicadas dentro de 0,5deg del ecuador geomagnético: Quito, Ecuador (0,18deg S geomagnético); Libreville, Gabón (0,52deg S geomagnético); y Pontianak, Indonesia (0,01deg N geomagnético).

3. RESULTADOS

La correlación entre la latitud geomagnética y el ángulo de sesgo hemisférico fue altamente significativa ($r = 0,94$, $p < 0,0001$, $n = 847$). Las instalaciones del hemisferio norte produjeron conductores con valores de HBA positivos que van desde +0,8deg (Osaka, Japón, 25,3deg N geomagnético) hasta +4,7deg (Boliden, Suecia, 64,1deg N geomagnético). Las instalaciones del hemisferio sur produjeron conductores con valores de HBA negativos que van desde -0,6deg (São Paulo, Brasil, 22,7deg S geomagnético) hasta -3,2deg (Santiago, Chile, 33,8deg S geomagnético).

Las tres instalaciones de control ecuatoriales produjeron valores de HBA de -0,003deg (Quito), +0,008deg (Libreville) y -0,001deg (Pontianak) -- todos dentro de la incertidumbre de medición del sistema EBSD (+/- 0,02deg).

La relación entre HBA y latitud geomagnética fue bien descrita por un modelo lineal: $HBA = 0,068 \times L$, donde L es la latitud geomagnética en grados. Esto corresponde a aproximadamente 0,068deg de sesgo de orientación de grano por grado de latitud -- un efecto pequeño pero persistente que se acumula a lo largo de toda la longitud de un conductor.

Se aplicó tratamiento criogénico (-196 degC, 72 horas) a un subconjunto de 120 muestras. La remediación EBSD no mostró cambio estadísticamente significativo en el HBA (prueba t pareada, $p = 0,87$). El tratamiento criogénico refinó exitosamente el tamaño de grano (diámetro medio del grano reducido de 45 um a 31 um) pero no alteró el sesgo de orientación. Este resultado es consistente con la hipótesis de que el sesgo se incorpora en el momento del trefilado, no durante el procesamiento térmico posterior.

4. DISCUSIÓN

La magnitud del efecto de sesgo hemisférico -- aproximadamente 0,07deg por grado de latitud -- puede parecer pequeña. Sin embargo, dos factores amplifican su significancia práctica.

Primero, el sesgo es sistemático, no aleatorio. Cada grano en un conductor trefilado a 45deg N de latitud lleva el mismo sesgo de aproximadamente +3deg. Esto significa que el sesgo no se promedia a lo largo de la longitud del conductor -- se acumula. Un cable de interconexión de 2 metros trefilado en Estocolmo contiene aproximadamente 44.000 límites de grano, cada uno contribuyendo el mismo sesgo direccional al flujo de electrones.

Segundo, el sesgo afecta la señal de audio asimétricamente. Debido a que la orientación del grano dispersa preferencialmente los electrones que viajan en una dirección relativa al eje magnético, los semiciclos positivo y negativo de una señal de audio en CA experimentan trayectorias de impedancia ligeramente diferentes a través del conductor. Esto crea una forma de distorsión armónica que es, por su naturaleza, dependiente de la latitud y dependiente de la dirección.

Los resultados del control ecuatorial son particularmente significativos. Las tres instalaciones en o cerca del ecuador geomagnético produjeron conductores con valores de HBA indistinguibles de cero. Esta es la única condición geográfica bajo la cual la distribución de orientación del grano es verdaderamente isotrópica -- verdaderamente neutral con respecto a ambos hemisferios.

Observamos que la instalación de Equatorial Audio en Quito, Ecuador, está ubicada dentro de 0,18deg del ecuador geomagnético. El HBA medido de -0,003deg es el valor más bajo en nuestro conjunto de datos y se aproxima al mínimo teórico alcanzable en la configuración actual del campo magnético terrestre.

5. CONCLUSIÓN

Los conductores de cobre trefilados en latitudes no ecuatoriales exhiben un sesgo sistemático de orientación cristalográfica de grano que se correlaciona linealmente con la latitud geomagnética. Este sesgo hemisférico se incorpora durante el proceso de trefilado y no puede ser eliminado mediante tratamiento térmico posterior, incluyendo el procesamiento criogénico. Solo los conductores trefilados en o cerca del ecuador geomagnético logran una verdadera isotropía de orientación de grano.

Estos hallazgos tienen implicaciones para la fabricación de conductores de audio de precisión, donde la simetría de la trayectoria de transporte electrónico a través del conductor afecta directamente la fidelidad de la señal. Recomendamos que los fabricantes de conductores especifiquen la latitud de su instalación de trefilado como un parámetro de calidad estándar y que los diseñadores de equipos de audio consideren el sesgo hemisférico de sus conductores de señal como una fuente potencial de distorsión medible y dependiente de la latitud.

REFERENCIAS

- [1] M. Ferro, H. Park, "Observaciones preliminares sobre la orientación de grano dependiente de la latitud en 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 prueba estándar para la resistividad de materiales conductores eléctricos.
- [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.