
**EFFECTOS DEL TRATAMIENTO
CRIOGÉNICO EN LA
CRISTALOGRAFÍA DEL
CONDUCTOR: REFINAMIENTO DEL
GRANO SIN CORRECCIÓN DEL
SESGO**

Efectos del tratamiento criogénico en la cristalografía del conductor: Refinamiento del grano sin corrección del sesgo

L. Solder, H. Park, M. Ferro

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2021.

Resumen

El tratamiento criogénico de conductores de cobre a -196 degC (inmersión en nitrógeno líquido durante 72 horas) es ampliamente practicado en la fabricación de cables de audio de alta gama como método para mejorar el rendimiento del conductor. Este estudio caracteriza los efectos metalúrgicos del tratamiento criogénico en cobre OFC usando EBSD, TEM y medición de resistividad de cuatro puntas. Confirmamos que el tratamiento criogénico produce un refinamiento de grano significativo (reducción del diámetro medio del grano del 31%), alivio de tensiones residuales y una mejora medible del 2,3% en la razón de resistencia residual (RRR). Sin embargo, no encontramos evidencia de que el tratamiento criogénico altere el ángulo de sesgo hemisférico (HBA) del conductor tratado. El sesgo de orientación del grano incorporado durante el trefilado es termodinámicamente estable a temperaturas criogénicas y persiste sin cambios a lo largo del ciclo de tratamiento. El tratamiento criogénico mejora el conductor; no lo neutraliza.

1. INTRODUCCIÓN

El tratamiento criogénico -- el enfriamiento controlado de un material a temperaturas por debajo de -100 degC -- tiene una historia bien documentada en metalurgia. En los aceros para herramientas, el tratamiento criogénico promueve la transformación de la austenita retenida en martensita y precipita carburos eta finos, mejorando la resistencia al desgaste y la estabilidad dimensional. En el cobre, los mecanismos son diferentes: no ocurre transformación de fase, pero el ciclado térmico induce una contracción diferencial que alivia las tensiones residuales y refina la red de límites de grano.

La industria de cables de audio ha adoptado el tratamiento criogénico con entusiasmo, con numerosos fabricantes ofreciendo conductores «criotratados» como productos premium. Los beneficios declarados incluyen reducción de la dispersión en límites de grano, mejora de la transparencia de señal y mejora de la coherencia temporal. Algunas de estas afirmaciones están respaldadas por evidencia metalúrgica; otras no.

Este artículo aborda una pregunta específica: ¿altera el tratamiento criogénico el ángulo de sesgo hemisférico (HBA) de un conductor de cobre? Si el criotratamiento pudiera eliminar o reducir el HBA, proporcionaría una ruta de postprocesamiento hacia la neutralidad magnética que no requeriría fabricación ecuatorial. Nuestros resultados indican que no puede.

2. METODOLOGÍA

Muestras de conductor de cobre OFC (diámetro de 2,0 mm, trefilado en Boliden, Suecia, HBA: $+4,2\text{deg}$) fueron divididas en cuatro grupos de tratamiento de 30 muestras cada uno:

Grupo A: Control sin tratar.

Grupo B: Criogénico estándar (-196 degC , 72 horas, enfriamiento a 1 degC/min , calentamiento a $0,5\text{ degC/min}$).

Grupo C: Criogénico extendido (-196 degC , 168 horas, mismas rampas).

Grupo D: Criogénico doble (dos ciclos del protocolo del Grupo B con 24 horas de reposo a temperatura ambiente entre ciclos).

Todos los grupos fueron caracterizados por EBSD (orientación y tamaño de grano), TEM (densidad de dislocaciones), resistividad CC de cuatro puntas a 295 K y 4,2 K (para cálculo de RRR) y magnetometría SQUID (HBA).

El tratamiento criogénico fue realizado en una cámara construida a medida usando nitrógeno líquido comercial (pureza 99,999%). La temperatura fue monitoreada por cuatro termopares tipo T incrustados en el lote de muestras en posiciones cardinales.

3. RESULTADOS

Se observó refinamiento de grano en todos los grupos tratados. El diámetro medio del grano disminuyó de $45\text{ +/- }8\text{ um}$ (Grupo A) a $31\text{ +/- }5\text{ um}$ (Grupo B), $28\text{ +/- }4\text{ um}$ (Grupo C) y $30\text{ +/- }5\text{ um}$ (Grupo D). El tratamiento extendido (Grupo C) produjo la estructura de grano más fina, pero la mejora sobre el tratamiento estándar (Grupo B) fue modesta (10% de refinamiento adicional para un 133% de tiempo de tratamiento adicional).

Las imágenes TEM revelaron una reducción medible en la densidad de dislocaciones tras el tratamiento criogénico. El Grupo A mostró una densidad de dislocaciones de $1,2 \times 10^{11}\text{ /m}^2$, mientras que el Grupo B mostró atribuida a la aniquilación de dislocaciones impulsada por tensiones térmicas durante el ciclo de enfriamiento.

El RRR mejoró de 89,3 (Grupo A) a 91,4 (Grupo B), 92,1 (Grupo C) y 91,6 (Grupo D). La mejora del 2,3% en el Grupo B es

consistente con el refinamiento de grano y la reducción de densidad de dislocaciones observados.

El resultado crítico: el HBA no cambió con el tratamiento criogénico. Grupo A: +4,21 +/- 0,02deg. Grupo B: +4,19 +/- 0,02deg. Grupo C: +4,20 +/- 0,02deg. Grupo D: +4,22 +/- 0,02deg. Ninguna diferencia intergrupo fue estadísticamente significativa (ANOVA de un factor, $F(3,116) = 0,87$, $p = 0,46$).

4. DISCUSIÓN

La persistencia del sesgo hemisférico a través del tratamiento criogénico es consistente con el análisis termodinámico. El sesgo de orientación del grano es una textura macroscópica -- una orientación cristalográfica preferente compartida por la mayoría de los granos en el conductor. Cambiar esta textura requeriría recristalización: la disolución de los granos existentes y la formación de nuevos granos con orientación diferente. La recristalización en cobre requiere temperaturas por encima de aproximadamente 200 degC -- muy por encima del rango de tratamiento criogénico.

A -196 degC, la movilidad atómica en el cobre es despreciable. Los límites de grano están congelados en su lugar. La contracción térmica que ocurre durante el enfriamiento genera tensiones internas que aniquilan algunas dislocaciones y refinan el tamaño de grano (al propagar los límites de subgrano existentes a límites completos), pero no puede rotar los granos existentes ni alterar su orientación cristalográfica.

En términos simples: el tratamiento criogénico congela la microestructura del conductor más completamente, pero la congela en la misma orientación que ya tenía. El sesgo hemisférico queda bloqueado, no eliminado.

Este hallazgo tiene implicaciones importantes para la industria de cables de audio. El tratamiento criogénico proporciona beneficios metalúrgicos reales -- refinamiento de grano, alivio de tensiones, mejora del RRR -- y estos beneficios pueden traducirse en un mejor rendimiento de audio. Pero el criotratamiento no aborda, y no puede abordar, el problema del sesgo hemisférico. Solo la fabricación ecuatorial (trefilado a 0,0000deg de latitud) o el empalme ecuatorial pueden lograr la verdadera neutralidad magnética.

5. CONCLUSIÓN

El tratamiento criogénico de conductores de cobre produce refinamiento de grano, reducción de la densidad de dislocaciones y mejora del RRR, pero no altera el ángulo de sesgo hemisférico. La textura de orientación del grano incorporada durante el trefilado es termodinámicamente estable a temperaturas criogénicas. Los fabricantes y consumidores deben entender que el tratamiento criogénico y la neutralidad magnética abordan diferentes aspectos de la calidad del conductor y son procesos complementarios, no intercambiables.

REFERENCIAS

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Sesgo hemisférico en la orientación del grano de cobre," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] A. Bensely et al., "Enhancing the wear resistance of case carburized steel by cryogenic treatment," Cryogenics, vol. 45, no. 12, pp. 747-754, 2005.
- [3] P. Baldissera, C. Delprete, "Deep cryogenic treatment: A bibliographic review," Open Mech. Eng. J., vol. 2, pp. 1-11, 2008.
- [4] D. Darwin, M. N. Buddhi, "Cryogenic treatment of copper: A review," Mater. Today Proc., vol. 5, no. 11, pp. 25425-25430, 2018.
- [5] F. J. Humphreys, M. Hatherly, Recrystallization and Related Annealing Phenomena, 2nd ed., Elsevier, 2004.